

Académie de Toulouse

Institut National Polytechnique
Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse
« DAA AGRO-GEOMATIQUE »

RAPPORT DE STAGE

**Estimation du LAI du palmier à huile
par télédétection
à très haute résolution spatiale**

Présenté et soutenu le 18 septembre 2008 par :

Fanny ROUSSEL

Sous la direction de **Camille Lelong**
(CIRAD/UMR TETIS Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale)
et avec le concours de **Jean-Pierre Caliman**
(CIRAD/UPR34 Systèmes de Pérennes)



CIRAD - UMR TETIS -
Maison de la Télédétection
500 rue Jean-François BRETON
34093 MONTPELLIER Cedex 5



Spécial dédicace à Sylvie

Un petit mot pour dire un grand merci à Sylvie, notre très chère et très aimée documentaliste.

Toujours prête à donner un coup de main, à nous renseigner. Que serait la doc sans elle ???

en tout cas pas ce petit lieux de détente où on est toujours invité à boire un café, à rigoler, à raconter notre galère du jour...

Merci Sylvie pour ta constante bonne humeur, pour tous les services que tu nous rends (particulièrement aux petits stagiaires qui sont toujours perdus en début de stage), pour tes conseils sur EndNote, pour tes recherches de publis, tes indications sur la reliure...

MERCI



Résumé

L'indice foliaire ou Leaf Area Index (LAI) est une variable biophysique clé pour comprendre les processus écophysiologiques d'un écosystème (photosynthèse, production brute, transpiration...). Cet index est un bon indicateur du statut agronomique des cultures et en particulier des palmiers. Une estimation rapide, précise et robuste du LAI constituerait une aide à la gestion des grandes plantations industrielles de palmiers à huile.

Le CIRAD entretient une coopération étroite avec des industriels du palmier à huile, pour développer une méthode d'estimation rapide du LAI afin d'améliorer la précision des pratiques agricoles. Le but sur le long terme est de pérenniser une agriculture raisonnée avec un meilleur respect de l'environnement. L'objectif de la présente étude est d'estimer le LAI d'un groupe ou bloc de palmiers d'une part, et d'un palmier individuel d'autre part, à partir de données de télédétection. En effet, les chercheurs ont mis en évidence que des indices de végétation, comme par exemple le NDVI, sont positivement corrélés avec le LAI. Etant donné que tout changement environnemental affecte la structure des arbres de la canopée, il est donc possible de mettre en évidence ces changements à l'échelle d'un seul arbre à l'aide de la très haute résolution spatiale.

La première phase du projet a consisté en l'élaboration d'une base de données quantitative de LAI mesurés sur le terrain à l'aide de trois techniques : destructives, photographie hémisphérique et LAI-2000 Plant Canopy Analyser (PCA) de LI-COR. Les protocoles de mesures ont dû être créés pour s'adapter à l'objet palmier. Deux types de mesures ont été faites : à l'échelle du groupe ou bloc de palmiers et à l'échelle de l'individu. Dans une deuxième phase, ces valeurs ont été croisées avec la radiométrie extraite de l'image Quickbird, de manière à établir les relations LAI / Indice de végétation.

Des modèles linéaires ont été établis permettant d'estimer le LAI à partir de l'image Quickbird. Seules les relations issues des mesures effectuées au LAI-2000 PCA ont été utilisées pour mettre en place les modèles, cette technique présentant des valeurs de LAI les plus proches et les plus cohérentes avec celles obtenues de la méthode destructive (corrélation = 0,76). Plus de mesures doivent à présent être effectuées pour améliorer la qualité des modèles et surtout les valider. Cependant, ces modèles permettent déjà d'établir des cartes du LAI de toute la plantation de manière à étudier les variations inter-bloc et intra-bloc. Cette étude confirme donc le potentiel de la télédétection, en particulier de la très haute résolution, pour cartographier le LAI d'une plantation à deux échelles : un bloc de palmiers, et un arbre individuel.

Mots clés : palmier à huile, agronomie, télédétection, très haute résolution, protocoles expérimentaux, LAI, NDVI.

Abstract

The Leaf Area Index (LAI) is a key parameter in process-based models of vegetation canopy response to global environmental change. It is a quite accurate index to estimate agronomic status of crops, and in particular of palm trees. A fast, reliable, and objective estimation of LAI could help to manage big industrial estates of palm trees.

The CIRAD has developed a partnership with palm trees industries, to set up methods for a fast LAI estimation, in order to increase the efficiency and the precision of farming practices. The objective of the present study is to derive the LAI of a group of palm trees on one hand, and one individual tree on the other hand, out of remote sensing data. Indeed, scientists had pointed out that vegetation indices such as NDVI are positively correlated to LAI. As any environmental change affects the structure of the tree canopy, it seems possible to enlighten its characterization using the very high resolution.

First, a field database was collected with three different LAI estimation techniques: destructive method, hemispherical photographs and LAI-2000 Plant Canopy Analyser of LI-COR. Field protocol needed to be developed to fit with our object: the palm tree. Two kinds of measurements were made: first on a group of palms and secondly on individual trees. LAI values were then confronted with the radiometry derived from a Quickbird image, to study the possible relationships between LAI and Vegetation Index.

We derived linear models to predict LAI for, on one hand, a palm-block and, on the other hand, an individual tree. These models are based on LAI PCA field measurements, which appeared to be the most accurate and coherent with destructive measurements, with a correlation of 0.76. The number of field measurements should though be increased to enhance the accuracy and, more especially, to validate the two developed models. However, these models already allow producing LAI maps of the whole plantation, to analyse the inter-block variability or even the intraparcellar one. As a conclusion, this study confirms the potential of remote sensing, and particularly at very high resolution, to map the LAI of a palm tree plantation at two different scales: a palm-block and an individual tree.

Key words: Oil palm, agriculture, very high resolution, experiment protocols, LAI, NDVI.

Remerciements

Mes remerciements vont naturellement vers Camille Lelong, qui a encadré ce stage de ses conseils techniques et pratiques. Merci de m'avoir guidé et fait confiance tout au long du projet.

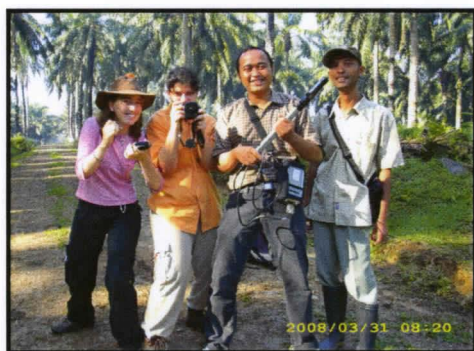
Je pense évidemment très fort à toute la « kelompok gila », particulièrement Doni, Anang, Nurul, Pak Eddy et notre cher gourou Pak Caliman qui ont fait de la mission Indonésienne une véritable aventure humaine de découverte et de partage. *Terima kasih orang gila, saya memperharapkan bertemu lagi.* Il n'y a rien de plus formateur que d'aller appréhender le terrain et comprendre tous les enjeux de nos recherches. Cette expérience qui a bien prouvé une fois de plus que la diversité est la richesse de ce monde.

Merci à Jean-Pierre Caliman pour ses conseils agronomiques et pour avoir permis cette mission Indonésienne.

J'ai également une attention particulière pour Marie Weiss, de l'INRA d'Avignon : un grand merci pour sa réactivité et ses conseils pour l'utilisation de son logiciel Can_Eye.

Une pensée à Elo, à tous nos moments de doutes et de galères sur notre hypothétique avenir, mais aussi à nos franches rigolades et nos pauses interminables. On peut dire que cette année a été riche en expériences !

Enfin, un immense merci aux stagiaires et autres thésards pour leur bonne humeur. Nos longs débats pour 'changer le monde sans qu'il s'en aperçoive' ont été très enrichissants. On se recroisera probablement en haut d'un sommet, dans une cabane au Canada, dans des yourtes en Auvergne ou dans un bus abandonné au fin fond de l'Alaska...



Sommaire

Résumé.....	1
Abstract.....	2
Remerciements.....	3
Sommaire.....	4
 INTRODUCTION	 5
 PARTIE 1. CONTEXTE DU STAGE	 6
 I CONTEXTE GENERAL	6
II CONTEXTE AGRONOMIQUE ET GEOMATIQUE	8
 PARTIE 2. DEFINITIONS ET ACQUISITION DES DONNEES	 14
 I ETAT DE L'ART	14
II DEFINITION DU LEAF AREA INDEX (LAI) ET PLANT AREA INDEX (PAI)	17
III ETABLISSEMENT DES PROTOCOLES	24
 PARTIE 3. TRAITEMENTS	 33
 I TRAITEMENT DES MESURES PRISES AU LAI-2000 PCA LI-COR	33
II TRAITEMENTS DES PHOTOS HEMISPHERIQUES	33
III TRAITEMENTS DE L'IMAGE QUICKBIRD	36
 PARTIE 4. RESULTATS, INTERPRETATION ET DISCUSSION	 41
 I RESULTATS ET INTERPRETATION	41
II DISCUSSION	52
 CONCLUSION	 55
 Bibliographie.....	57
Table des matières.....	60
Table des figures.....	62
Table des annexes.....	63

Introduction

Le palmier producteur d'huile (*Eleais Guineensis Jacql.*) originaire du Golfe de Guinée, se retrouve aujourd'hui dans toutes les zones tropicales humides et particulièrement en Asie du Sud-Est. La demande croissante en matière grasse d'origine végétale, constituant de base d'une large catégorie de nos aliments et utilisée comme agro-carburant, a poussé la filière à développer de grosses plantations industrielles au détriment des systèmes forestiers tropicaux et des petites plantations familiales. Depuis les années 1970, les surfaces allouées à cette culture se sont multipliées par trente. Selon les prédictions de la FAO elles devraient encore doubler dans les vingt années à venir. La Malaisie et l'Indonésie sont de nos jours les deux plus gros producteurs d'huile de palme, assurant 85% de la production mondiale.

Le palmier à huile est la culture oléagineuse la plus productive (6 à 8 tonnes d'huile/ha/an) ; sa croissance est rapide et ininterrompue tout au long de sa vie. Cette culture a été implantée massivement sur tous types de sol, souvent peu nutritifs, nécessitant une consommation importante de fertilisants tout le long de l'année. La situation est périlleuse non seulement pour les producteurs dont les couts d'engrais représentent 25% du cout total de production, mais également pour le milieu en raison des fortes pollutions chimiques engendrées par cette culture. Les sociétés civiles et écologistes dénoncent l'impact néfaste de l'industrialisation de l'huile de palme sur l'environnement, industrie qui pourtant alimente toutes nos firmes agro-alimentaires en matière grasse végétale. Une réflexion sur la durabilité de cette culture est menée par les plus gros industriels qui multiplient les études et développent des outils pour mieux piloter la fertilisation des plantations.

Le CIRAD travaille dans cette optique de raisonnement et de durabilité en partenariat avec un gros industriel de la culture du palmier à huile en Indonésie : le groupe *Sinar Mas Agribusiness Resource and Technology*. L'objectif de cette collaboration est de développer des outils pratiques pour améliorer et raisonner la gestion de la plantation, notamment en estimant des paramètres biophysiques par télédétection à des fins de caractérisation de l'état de la culture.

La présente étude s'inscrit dans cette volonté de recherche d'indicateurs pour le diagnostic agronomique par télédétection de la plantation. En effet, un stress quel qu'il soit va engendrer des modifications structurales de la canopée, donc de l'indice foliaire de l'arbre. Le *Leaf Area Index* (LAI) est par conséquent un paramètre largement utilisé pour évaluer le statut agronomique du palmier. En outre, il est théoriquement estimable par télédétection grâce à sa forte corrélation avec différents indices de végétation calculés à partir de sa radiométrie, tels que le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI, cf. Baret et Guyot, 1991 ; Jonhson et al. 2002). Notre objectif est donc de valider la possibilité d'estimer le LAI du palmier à huile par télédétection, à l'échelle de l'individu tout comme à celle du groupement d'arbres, afin de détecter et cartographier les variations du LAI au sein des plantations de palmiers.

Ce stage s'est déroulé en deux temps. D'une part, une grande campagne de collecte de données a permis de constituer une importante base de données de LAI pour l'apprentissage de la méthodologie. D'autre part, le traitement et l'analyse de ces données a permis d'établir le potentiel de la télédétection pour répondre à nos objectifs. Afin de présenter le travail effectué, la première partie de ce mémoire établit le contexte général de l'étude, suivi par une présentation des données. La troisième partie détaille tous les traitements effectués et, enfin, la dernière partie présente et discute les résultats de l'étude.

Partie 1. Contexte du stage

I Contexte général

I.1 La structure d'accueil

Ce stage s'est déroulé au sein de la Maison de la Télédétection à Montpellier (MTD), pôle de compétences sur la maîtrise de l'information spatiale au service de l'agriculture, de l'environnement et de l'aménagement des territoires, regroupant des équipes du CIRAD, du Cemagref, de l'ENGREF (UMR TETIS), de l'IRD (US ESPACE, UR Désertification), des chercheurs visiteurs et des entreprises privées (ex : L'Avion Jaune, Nev@ntropic...). Leurs missions couvrent la recherche, la formation, l'expertise et le transfert de méthodes vers les opérateurs socio-économiques (Ministères, collectivités territoriales, opérateurs privés,...).

Le CIRAD ou Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (<http://www.cirad.fr>) est un institut de recherche français classé dans la catégorie des établissements publics à caractères industriel et commercial (EPIC). Il a été créé en 1984 par le regroupement de neuf instituts de recherche agronomique appliquée aux régions chaudes. Sa mission est de contribuer au développement rural des pays tropicaux et subtropicaux par des actions de recherche, des réalisations expérimentales, des actions de formation (France et étranger) ou encore la diffusion d'information scientifique et technique en privilégiant les actions en partenariat. Il est structuré en trois départements :

- Systèmes Biologiques (BIOS), qui se concentre sur la plante et les échelles plus petites que la plante jusqu'au gène,
- Performance des Systèmes de Production et de Transformation Tropicaux (PERSYST), qui s'intéresse aux agrosystèmes,
- Environnement et Sociétés (ES), qui replace la plante ou l'agrosystème dans son milieu et analyse ses interactions avec l'environnement et avec l'homme.

Au sein de ce département ES, l'Unité Mixte de Recherches « Territoire, Environnement, Télédétection et Information Spatiale » (UMR TETIS, <http://www.tetis.teledetection.fr>) mène des recherches sur les méthodes d'analyse et de représentation spatiale de systèmes agroenvironnementaux et territoriaux, selon quatre axes :

- 1) l'analyse des structures et des dynamiques spatiotemporelles de ces systèmes et de leur perception par les acteurs;
- 2) l'acquisition et le traitement des données spatialisées (télédétection, Mnt, Gps...);
- 3) l'ingénierie des systèmes d'information;
- 4) les démarches de développement territorial et de gestion agroenvironnementale ainsi que la place des systèmes d'information.

L'UMR TETIS regroupe en outre des équipes issues du CIRAD, du Cemagref et de l'ENGREF autour d'un projet scientifique et de moyens communs.

I.2 Le projet

Ce stage s'insère dans un projet exploratoire du potentiel de la télédétection pour proposer des outils adaptés à l'aide à la gestion des palmeraies à huile, monté en 2002 par Camille Lelong, chercheur à l'UMR TETIS, et Jean-Pierre Caliman, chercheur dans l'unité PERSYST (UR34) du département du même nom au CIRAD. Ce dernier a développé depuis

plus de 10 ans une étroite collaboration avec la compagnie PT-SMART, filiale agro-technologique de l'un des quatre plus gros industriels indonésiens de production d'huile de palme : le groupe *Sinar Mas Agribusiness Resource and Technology*. La culture principale de PT-SMART est celle du palmier, avec une surface exploitée de 110 000 hectares. Trente usines assurent l'extraction et le raffinage de l'huile de palme jusqu'aux produits finis (huile de cuisine, margarine, cosmétiques...). Sa production annuelle s'élève à plus de 2 millions de tonnes d'huile par an, soit un septième de la production indonésienne.

Cette entreprise développe ainsi son pôle de recherche, SMART-Research Institute (SMARTRI), en partenariat avec le CIRAD, renforcé par l'affectation de J.P. Caliman, aujourd'hui directeur de la division recherche du groupe. Elle dispose de plus de 200 stations expérimentales réparties sur les îles de Sumatra, Sud Kalimantan (Sud Bornéo) et en Irian Jaya (Ouest de la Papouasie). Les recherches portent sur la gestion des plantations aussi bien que sur l'optimisation du raffinage. Dans le cadre du présent projet, l'entreprise finance une partie des recherches et met à disposition champs expérimentaux, matériel et main d'œuvre nécessaires au déroulement des campagnes de mesures. Notre mission s'inscrit plus particulièrement dans le cadre du diagnostic agronomique par télédétection, par le biais de l'indicateur « indice foliaire ».

I.3 Le site d'étude

La présente étude se focalise sur une seule plantation de palmiers à huile en monoculture, située à Padang Halaban (2°18'40.48 "N - 99°49'10.15"E), région de Nord Sumatra en Indonésie (cf. Figure 1).



FIGURE 1 : CARTE DE LOCALISATION DE LA PLANTATION DE PADANG HALABAN

Ce site est la plantation la plus ancienne du groupe PT-SMART, elle a été mise en place en 1926 et occupe à l'heure actuelle une surface de 7210 hectares. Elle a la particularité de présenter la plus grande variabilité d'âges de palmiers et de matériel végétal, par rapport aux autres exploitations industrielles, présentant ainsi une large variabilité en terme de densité de végétation (donc d'indice foliaire).

L'île de Sumatra est située dans une zone à climat tropical humide. La plantation de Padang Halaban est située dans une zone humide de Sumatra, en région tropicale voire équatoriale : 7 à 9 mois consécutifs humides (pluviométrie moyenne comprise entre 100 et 200 mm) pour 3 mois consécutifs secs (pluviométrie mensuelle inférieure à 100mm) généralement de juin à août. La température moyenne mensuelle varie entre 21°C et 31°C selon l'altitude et la localisation sur l'île, pour un ensoleillement moyen de 1825 heures par an. Ces caractéristiques climatiques sont particulièrement favorables au développement du palmier à huile.

II Contexte agronomique et géomatique

II.1 Le palmier dans le monde

Le palmier cultivé pour son huile, *Elais Guineensis*, est originaire de la zone inter-tropicale humide d'Afrique. La culture du palmier permet de produire l'huile de palme d'une part (extraite de la pulpe de la drupe) et l'huile de palmiste (extraite de l'amande du noyau) d'autre part, qui ont de nombreuses applications comestibles, cosmétiques, pharmaceutiques, lubrifiantes et combustibles.

Les traces écrites de sa commercialisation en Europe remontent au XVIII^e siècle. Sa culture s'est tout d'abord développée en Afrique, particulièrement au Bénin, pour s'étendre à toutes les zones tropicales humides du monde. Tout d'abord en Amérique Latine au XVI^e siècle, puis plus tard en Asie du Sud Est sur l'île de Java en Indonésie en 1848. Les potentialités agro-climatiques de la Malaise et de l'Indonésie assurèrent un développement fulgurant de cette culture. Les premières plantations industrielles datent de 1911 sur l'île de Sumatra. De nos jours l'Indonésie exploite près de 3.1 millions d'hectares de palmeraies (cf. Figure 2) et 3.5 millions d'hectares pour la Malaisie. Un développement identique s'est opéré en Océanie qui présente les mêmes conditions pédo-climatiques que les pays d'Asie du sud est.

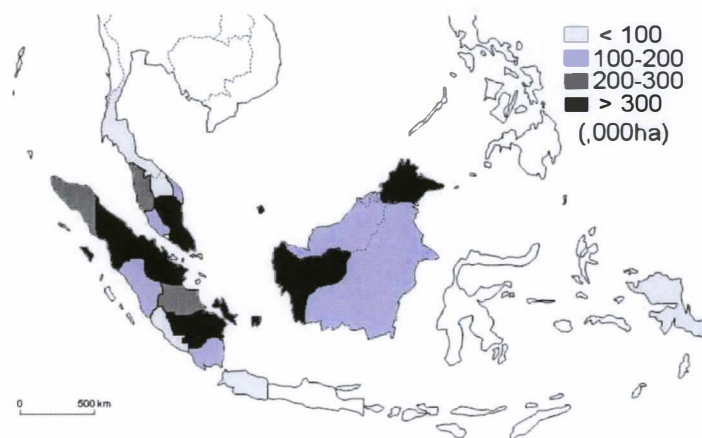


FIGURE 2 : DISTRIBUTION DU PALMIER A HUILE EN ASIE DU SUD EST EN 2003 (T. FAIRHURST & HARDTER)

Indonésie et Malaise sont les deux plus gros producteurs mondiaux d'huile de palme. En 2007/2008, la production Indonésienne s'élève à 18 millions de tonnes et 17 millions de tonnes pour la Malaise, ce qui correspond respectivement à 45% et 42% de la production mondiale (USDA Foreign Agricultural Service, United States Department of Agriculture). Ces deux pays assurent aujourd'hui plus de 86% de la production mondiale d'huile de palme. Les valeurs de production des principaux pays sont présentées en Annexe 1.

II.2 Morphologie du palmier à huile

Le palmier à huile *Elaeis Guineensis* est une légumineuse monocotylédone de la famille des Arécacées dont les 2.500 espèces se répartissent dans les régions tropicales et sub-tropicales.

Le système racinaire est de type fasciculé, des milliers de racines prennent naissance à la base du stipe et s'enfoncent de 40 à 50cm dans le sol. Le stipe ou 'faux tronc' prolonge la partie racinaire à l'extérieur du sol. Il est de forme tronconique de 80 cm de diamètre en moyenne à la base, et de 40 cm de diamètre à une hauteur de 1m.

Le stipe (cf. Figure 3) porte à son extrémité supérieure l'apex végétatif à croissance constante en conditions normales. Ainsi, son développement en hauteur est indéfini.

L'apex s'insère dans la couronne foliaire de 30 à 45 feuilles appelées palmes mesurant 5 à 8m de long et pesant 5 à 8 kg. Les palmes sont disposées sur une spirale caractéristiques entourant le bouquet de jeunes feuilles non épanouies ou 'flèches'.

Chaque palme se compose d'un pétiole massif couvert d'épines et d'un rachis souple sur lequel s'insèrent les folioles (jusqu'à 400) qui constituent le limbe composé de la palme. L'axe « pétiole + rachis » est appelé nervure dont la forme évolue de l'insertion de la palme jusqu'au point A marquant l'extrémité du rachis (cf. Figure 4).



FIGURE 3 : DESCRIPTION DU PALMIER A HUILE

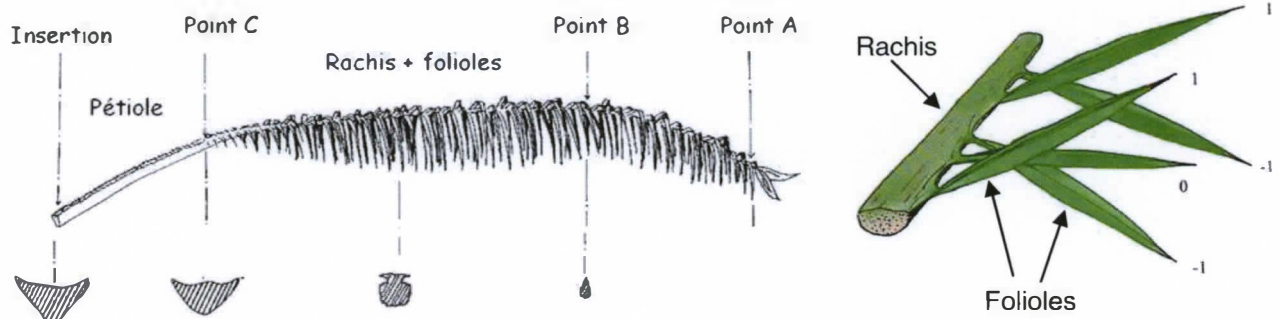


FIGURE 4 : DESCRIPTION D'UNE FEUILLE DE PALMIER A HUILE, OU PALME.

Le palmier est une plante monoïque, les deux inflorescences mâles et femelles sont présentes sur le même arbre, mais émises en cycles successifs. Il y a donc obligatoirement allogamie. Une fois les inflorescences femelles fécondées, on parle de régime qui, à maturité, sera récolté. Le régime est situé à l'aisselle des feuilles et se présente sous la forme d'une masse ovoïde constituée de drupes (cf. **Figure 5**).



FIGURE 5 : COLLECTE DE REGIMES (PHOTO DE GAUCHE) ET DE DRUPES (PHOTO DE DROITE)

Ces drupes sont collectées afin de produire deux types d'huile. L'huile de palme d'une part est issue de pressage de la pulpe ou mésocarpe de la drupe (cf. Figure 6). Elle est utilisée comme huile de cuisine et entre dans la composition de nombreux produits transformés (lait en poudre, margarine, gâteaux...). L'huile de palmiste, extraite de l'amande de la drupe, est utilisée dans des produits non alimentaires. Elle entre dans la composition de produits tels que les savons, détergents, peintures ainsi que de produits pharmaceutiques et cosmétiques.

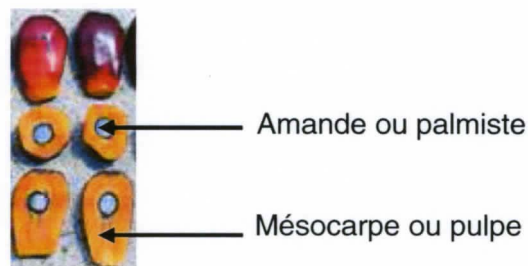


FIGURE 6 : DESCRIPTION DE LA DRUPE DU PALMIER

II.3 Pratiques culturelles et impact environnemental

La culture du palmier présente trois étapes :

① Germination et pré-pépinière : les graines issues de sélection sont mises à germer puis plantées en pré-pépinières pendant 4 mois jusqu'à l'obtention d'une plantule de 3-4 feuilles avec système racinaire développé. A ce stade la plante est totalement autotrophe et peut être repiquée.

② Pépinière : Les plants sont repiqués dans des sacs comportant des substrats nutritionnels. La culture en pépinière dure 7 à 9 mois. Les palmiers juvéniles sont disposés en champ à 70 cm les uns des autres (cf. Figure 7).



FIGURE 7 : PALMIERS JUVENILES EN PEPINIERE

③ Plantation au champ : Les palmiers sont ensuite repiqués en quinconce selon un motif de triangle équilatéral, chaque palmier étant distant de son voisin de ses six voisins de 9 mètres (cf. Figure 8). Un andin est disposé un interligne sur deux. Ces andins sont formés des palmes découpées au fur et à mesure de la croissance de l'arbre (élagage, récolte).

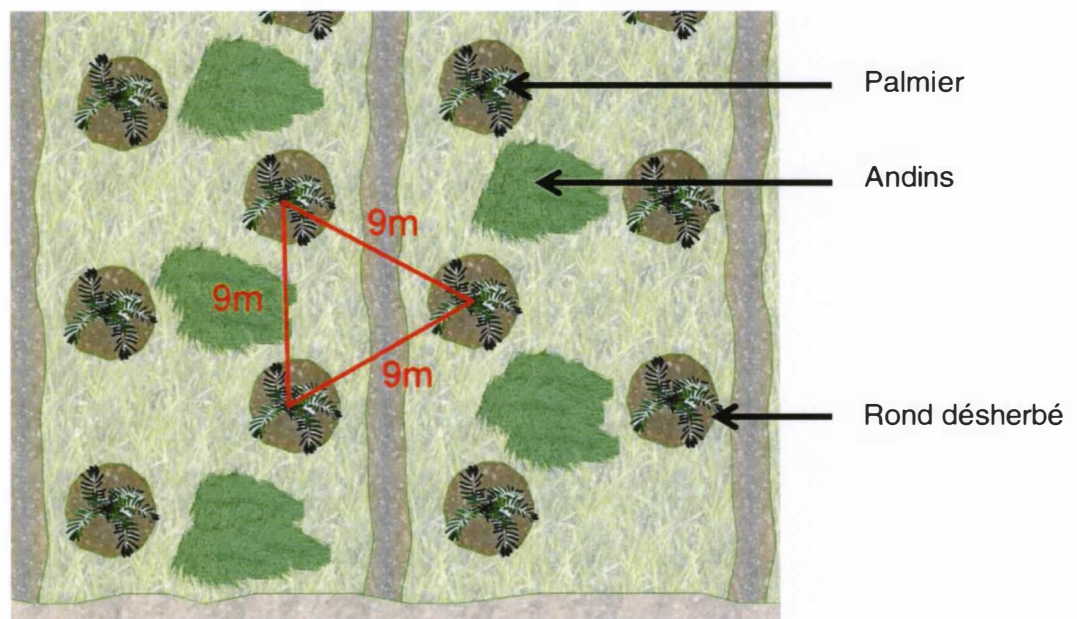


FIGURE 8 : PLANTATION DE JEUNES PALMIERS VUE DE DESSUS

Les palmiers commencent à produire des régimes environ trois ans après la mise en plantation. La phase de production économiquement intéressante s'étend sur 20 à 30 ans (Jacquemard et al., 1995). Quand le palmier atteint une hauteur de 20 à 25 mètres, la récolte devient impossible et les palmiers sont alors arrachés et replantés.

Une plantation en exploitation produit de 6 à 8 tonnes d'huile à l'hectare soit 27.300 kg de fruits. Le palmier à huile est la plante oléagineuse la plus productive au monde. Sa croissance végétative nécessite un sol à très haute fertilité. Or le développement fulgurant des plantations dû à la demande croissante d'huile au niveau mondial a engendré un développement des cultures sur des sols sableux peu fertiles nécessitant l'emploi d'engrais minéraux. Leur utilisation a considérablement augmenté du fait de l'expansion des surfaces : 250 Mt d'engrais NPK étaient épandues en 1980 contre 250.000 Mt en 2000. Les coûts de fertilisation représentent 60 à 65% des coûts d'entretien d'une plantation (Fairhurst et Caliman, 2001). Un des points clefs de la gestion de la plantation est donc la détection du statut agronomique du palmier à des fins d'adaptation de la fertilisation (agriculture raisonnée).

Par ailleurs, peu de ces éléments se retrouvent dans l'huile, la plupart étant nécessaire seulement pour la croissance de la plante et se retrouvent dans les parties végétatives. De plus, les pratiques agricoles sur le terrain mettent en évidence une sur-fertilisation difficilement quantifiable. Par exemple, moins de 70 % jusqu'à moins de 20 % de l'azote apporté est capté par les palmiers (Meisinger et Randall, 1991). L'utilisation des andins comme engrais organique est une des solutions envisagées pour valoriser l'assimilation des éléments dans les parties non productives de la plante. Cependant, malgré ces pratiques, l'excédent d'engrais (azoté et phosphoré en particulier) est lessivé et se retrouve dans les cours d'eau ou les nappes phréatiques et provoquent des phénomènes d'eutrophisation, de prolifération d'algues et de pertes d'habitats fauniques (Commissaire à l'environnement et au développement durable, 2001). L'impact environnemental de ces plantations industrielles est donc très négatif et largement controversé. PT-SMART participe depuis quelques années à peine à la « Table Ronde » sur les bonnes pratiques en respect avec l'environnement et tente de réduire ces impacts. A l'heure actuelle cette démarche reste du domaine de la recherche mais on peut espérer voir aboutir des solutions dans un futur proche.

II.4 Problématique et objectifs de la présente étude

C'est dans ce contexte de recherche d'outils de diagnostic que s'insère le présent projet, avec un double objectif : celui de réduire les coûts d'exploitation d'une part et de limiter les impacts négatifs sur l'environnement d'autre part, tout en maintenant voire en augmentant la production de la plantation. L'enjeu global est une gestion raisonnée de la plantation assistée par la géomatique.

Des diagnostics foliaires peuvent être effectués, mais nécessitent des dispositifs de dosage peu pratiques et très coûteux (du type spectromètre d'absorption atomique), impliquant un échantillonnage drastique sur le terrain. A l'heure actuelle celui-ci est effectué en prenant aléatoirement un arbre sur cent dans une parcelle, ce qui n'est généralement ni représentatif de l'hétérogénéité intraparcellaire, ni efficace pour détecter des anomalies locales. Il devient donc primordial d'utiliser un indicateur plus exhaustif et plus facile à estimer, caractérisant l'état agronomique du palmier individuel ou du groupe de palmiers de manière à localiser les foyers de palmiers stressés pour agir de façon précise.

Or, l'un des signes apparents de stress (chez le jeune palmier à huile notamment) est le ralentissement de son développement foliaire et une modification notable du port de l'arbre (affaissement des palmes). L'indice foliaire (ou LAI, pour Leaf Area Index) et le taux de couverture de la canopée sont donc des paramètres utiles pour détecter un stress éventuel de l'arbre. Toutefois, la mesure sur le terrain de ces paramètres à l'échelle d'une plantation

entière est difficile avec les techniques actuelles (LAI-2000 PCA, Photographie Hémisphérique, etc...) en raison des problèmes de mise en œuvre technique, d'échantillonnage et de lourdeur des traitements. L'utilisation de la télédétection serait donc un atout considérable de part sa facilité de mise en œuvre, le caractère exhaustif de l'information relevée et la puissance de la cartographie pour le repérage des zones à problèmes ou à risques.

L'objet principal de cette étude est donc de **développer une méthodologie d'estimation du LAI du palmier à huile à partir d'images satellites multispectrales à très haute résolution spatiale**. L'étude portera d'une part à l'échelle d'un bloc de palmier, mais également à l'échelle du palmier individuel. Le potentiel des images multispectrales à très haute résolution spatiale paraît évident à l'échelle d'un individu « arbre ». Cependant, dans le cas d'un objet complexe comme le palmier, les outils de traitements restent à développer pour extraire la radiométrie de l'objet d'étude et pour établir des relations quantitatives fiables entre cette radiométrie et le LAI. On doit en particulier se baser sur des mesures de terrain permettant de créer un modèle empirique d'estimation du LAI.

L'étude c'est donc organisée en trois temps :

- 1) une campagne de mesures sur le terrain (2 mois sur la plantation de Padang Halaban). L'objectif a été de collecter le plus grand nombre de données sur le plus grand nombre de situations rencontrées (arbres en bonne santé, malades, carencés, à des densités de plantations différentes, à des stades de développement différents...) au moyen de différentes méthodes de mesures.
- 2) le traitement de ces données (3 mois, à la MTD à Montpellier) afin d'obtenir des valeurs de référence du LAI sur des palmiers et sur des parcelles bien identifiées, à partir de trois techniques différentes.
- 3) le traitement et l'analyse d'une image Quickbird acquise sur la plantation (1 mois, à la MTD à Montpellier), pour identifier et valider les relations entre le signal radiométrique (calcul d'indices de végétation) et les mesures de référence du LAI.

Partie 2. Définitions et acquisition des données

I Etat de l'art

La géomatique (association de la télédétection et du SIG) appliquée à l'agronomie s'est tout d'abord développée dans les plantations industrielles pour cartographier les rendements des plantations de façon précise (Chew, 1997) ou pour gérer l'espace en fonction des contraintes topographiques (Tey et al., 2000). Dans un souci d'amélioration de la gestion de la production, les industriels mettent aujourd'hui à contribution toutes les techniques et les méthodes de recueil d'information, portant autant sur les terrains cultivés que sur les cultures elles-mêmes, de manière à prendre en compte l'hétérogénéité locale dans un contexte d'agriculture de précision (Nemenyi et Milics, 2007; Murakami et al., 2007; Adrian et al., 2005; Hurley et al., 2005; Stenberg et al., 2005). C'est donc une discipline en plein essor dans le domaine de la gestion agronomique.

I.1 Les paramètres biophysiques mesurés en télédétection

La production des palmiers est surtout dépendante de l'environnement des arbres, qui va conditionner son état sanitaire, nutritionnel et hydrique. Certains paramètres clefs tels que la concentration en nutriments dans les palmes, ou le développement foliaire témoignent du statut agronomique du palmier ; ils peuvent être mesurés sur le terrain. Cependant, les techniques d'acquisition à mettre en œuvre sont souvent coûteuses et contraignantes.

Azleen (2001) a mis en évidence que les macro-éléments et les oligoéléments des palmes peuvent être évalués par télédétection grâce à des corrélations avec des indices de végétation (NDVI, SAVI, ARVI), mais Lelong et al. (2006) ont mis en garde sur les limites de cette approche, même à partir de données hyperspectrales, et sur les erreurs importantes sur l'estimation quantitative de ces teneurs. Il semble donc délicat de s'attacher à prédire directement ces paramètres biochimiques.

De nombreuses références mettent en évidence que le LAI est un bon indicateur des caractéristiques végétatives et de l'état agronomique des cultures en général (e.g. pour les céréales : Jongschaap, 2007 ; Lelong et al., 2008 ; pour l'hévéa : Righi et Bernardes, 2008 ; pour le palmier : Naert et al. 1990). En effet, beaucoup de procédés écophysiologiques d'un écosystème sont contrôlés par le LAI : interception de la lumière (Machado & Reich, 1999 ; Vargas et al., 2002), production brute (Coyea & Margolis, 1994 ; Vose et Allen, 1988) ou transpiration (Granier et al. 2000). Il semble que le LAI permette de détecter et localiser d'éventuels ralentissements de développement des arbres. C'est donc le paramètre qui sera étudié dans notre étude pour mettre en évidence l'état agronomique des palmiers. De plus, pour la plupart des couverts végétaux, ce paramètre peut être estimé à l'aide d'images satellites car le signal radiométrique lui est fortement corrélé (Cihlar et al., 1991; Rondeaux et al., 1996; Gitelson et al., 1996; Huete, 1988; Lelong et al., 2008).

McMorrow (2000) va plus loin et met en évidence des corrélations entre LAI et certains indices de végétation comme le NDVI et le IRI sur des palmiers. De même, ce paramètre est

utilisé comme indicateur de l'état des mangroves par Kovacs et al. (2003), qui mettent en évidence une corrélation entre NDVI et LAI très forte ($r^2=0,71$). Cependant, la qualité de la relation entre LAI et NDVI est très dépendante du type de couvert (Colombo et al. 2002). Beaucoup de paramètres externes influent sur la radiométrie et induisent du 'bruit' dans le signal comme par exemple l'âge du palmier ou la topographie (McMorrow, 1995).

I.2 Intérêt de la très haute résolution

Les travaux sur la moyenne résolution ont donc permis d'établir le lien entre la radiométrie et le LAI et ainsi de cartographier ou de définir les variations inter parcellaire (Sprinstin et al. 2006). La très haute résolution permet aujourd'hui d'étudier ces variations au niveau intra-parcellaire comme le montre l'étude de Johnson et al. (2002) sur la cartographie du LAI de la vigne à 2 mètres de précision. Notre étude se placera donc à deux échelles : d'une part le bloc de palmiers, et d'autre part le palmier lui-même. Dans le second cas, la très haute résolution est incontournable pour obtenir la définition de l'objet et sa détection par rapport au fond végétal.

I.3 Choix des indices de végétation

L'étude de Baret et Guyot (1991) teste le potentiel de six indices de végétation pour estimer le LAI. Il ressort que les relations LAI/indices de végétation suivent une loi exponentielle du fait d'une saturation pour des fortes valeurs de LAI. Les indices de végétation minimisant l'effet du sol (PVI, SAVI, TSAVI) estiment très bien le LAI pour des valeurs de LAI faibles ($LAI < 2-3$). Cependant, la tendance est inversée pour des forts LAI : ces indices induisent un bruit trop important particulièrement quand les LAI de saturation sont atteints. Dans ce cas le NDVI semble plus stable. Théoriquement le palmier se situe dans une tranche de LAI fort : on testera en priorité le NDVI et, éventuellement, le SAVI.

I.4 Les techniques d'estimation du LAI

On distingue deux types de mesures du LAI (Jonckheere et al., 2002) : méthode directe et méthode indirecte. La méthode directe est destructive : elle consiste à mesurer l'aire de chaque feuille de l'objet manuellement, l'aide d'un planimètre facilitant l'expérimentation. Cette méthode permet d'avoir une bonne estimation du LAI, mais est assez lourde à mettre en œuvre sur des forêts ou des plantations d'arbres et souvent très longue. Le deuxième type de méthode est indirect : de nombreuses techniques existent dont on distingue des méthodes nécessitant un contact avec l'objet et celles sans contact direct :

Contact avec l'objet

- **'Inclined point quadrat'** : calcule le LAI à partir du nombre de feuilles rencontrées lors de l'insertion d'une longue aiguille dans la canopée à angle azimutal et d'un modèle d'équation de pénétration radiative.
- **'allometric method'** : le LAI est estimé en mettant en place des corrélations entre l'aire foliaire et des paramètres biophysiques faciles à calculer tels que le diamètre du tronc, la hauteur de la canopée...

Aucun contact direct

*basé sur la transmission
de la lumière selon la loi
de Beer Lambert*

- **DEMON** : mesure la transmission de la lumière d'un faisceau solaire incident sur la canopée à différents angles solaires, ce qui permet d'estimer la fraction de trou du couvert.
- **Ceptometer** : mesure directement la fraction de trou du couvert à l'aide de 80 capteurs mesurant la lumière incidente sous la canopée.
- **LAI-2000 Plant Canopy Analyser** : utilise un capteur fish-eye pour mesurer la radiation incidente sous la canopée et sur la canopée, ces deux valeurs intégrées dans un modèle de Poisson permettant d'estimer le LAI.
- **TRAC Tracing Radiation and Architecture of Canopies instrument** : mesure la distribution de trou dans la canopée et donne le facteur de d'agrégation (ou clumping) ; le LAI s'obtient après une demi journée de mesure.
- **Hemispherical canopy photography** : Traite des photographies hémisphériques prises sous la canopée à l'aide d'une lentille fish eye. On obtient après traitement, une estimation du LAI mais aussi du clumping.

Les caractéristiques de chacune des méthodes présentées ci-dessus sont précisées en Annexe 2. La principale source d'erreur, quelle que soit la méthode utilisée, lors de l'estimation du LAI est le facteur d'agrégation des feuilles (Jonhson et al. 2002, Jonkheere et al. 2002). Celui-ci affecte de manière non négligeable la qualité des mesures de LAI des canopées non isotropes (Nouvellon et al., 2000). En effet, les techniques présentées sont adaptées à des canopées isotropes avant une insertion des feuilles aléatoires, ce qui n'est pas le cas du palmier.

Chaque méthode présentée ci-dessus a ses avantages et ses inconvénients et doit être adaptée à l'étude et au type d'objet étudié. Un appareil idéal posséderait un capteur hémisphérique de manière à mesurer simultanément la fraction de trou à différents angles zénithaux, de manière à être beaucoup plus efficace que les capteurs linéaires mesurant un seul angle zénithal à chaque prise. Il serait capable d'estimer le facteur de clumping en dérivant la fraction de trou, il devrait différencier la végétation chlorophyllienne de la végétation sénescence, enfin il devrait donner une image de chaque mesure faite sous couvert de manière à identifier un éventuel problème. La plupart de ces caractéristiques se retrouvent dans l'appareil photo hémisphérique (Jonckheere et al., 2002). D'après les études de comparaison des différentes techniques de mesure du LAI au niveau d'une parcelle, il ressort que la photographie hémisphérique permet une aussi bonne estimation du LAI que les autres techniques, mais propose en plus une estimation du paramètre de clumping et constitue la méthode la moins onéreuse (Weiss et al. 2002 ; Jonkheere et al. 2005). Nous nous sommes donc naturellement orientés vers cette technique, ainsi que celle du LAI-2000 Plant Canopy Analyser (LAI-2000 PCA) qui présente l'avantage d'être portable et de mesurer la fraction de trou à l'aide d'une lentille hémisphérique de type 'fish-eye', tout comme l'appareil photo hémisphérique, pour mesurer la fraction de trou. Le seul désavantage de cette deuxième technique est la nécessité d'avoir deux appareils : un appareil qui mesure le rayonnement incident au dessus de la canopée et un autre qui effectue les mesures au dessous de la canopée.

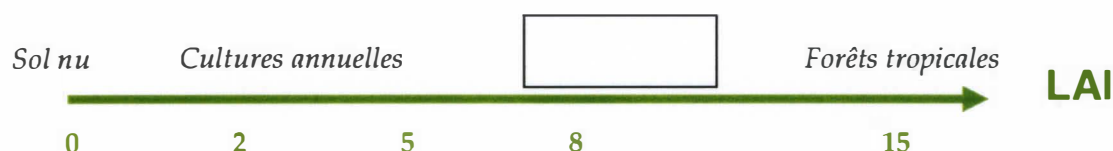
Nous avons tout d'abord effectué des mesures destructives qui permettent d'estimer de la façon la moins erronée le LAI du palmier. Cependant ces techniques étant lourdes à mettre en œuvre et compte tenu du temps de mission et de la grande variabilité de situations à mesurer (4 types de matériel végétal et 20 âges différents) l'utilisation de techniques indirectes plus rapides s'imposait. Les mesures destructives serviront à calibrer les méthodes indirectes. Les protocoles des trois méthodes de mesure doivent être établis car à ce jour, aucune étude n'a été menée sur le palmier concernant les mesures de LAI à l'échelle du palmier.

II Définition du Leaf Area Index (LAI) et Plant Area Index (PAI)

Le LAI est une variable biophysique qui caractérise les phénomènes de transfert radiatif entre la végétation et l'atmosphère. Elle constitue une variable clé dans tous les modèles écologiques, hydrologiques, climatologiques, géo-morphologiques et agronomiques. Le LAI est utilisé dans les processus d'évapotranspiration et de photosynthèse qui permet notamment d'estimer la biomasse aérienne.

La première définition définit le LAI comme l'aire totale d'une face de feuille par unité de surface au sol (Watson 1947). Cette définition a évolué pour s'adapter à des types de couverts très différents. Chen et Black (1992) le définissent comme la moitié de la surface foliaire interceptrice par unité de surface au sol, définition valable pour tout type de couvert.

Le LAI est une variable sans dimensions et dont les valeurs s'échelonnent de 0 à 15 environ selon le type de couvert. Plus le couvert est dense et plus le LAI est fort.



Le PAI ou plant Area Index est un indice dérivé du LAI. Il s'agit du rapport de la surface de la plante entière rapportée à la surface au sol. Les conditions terrains rendent souvent la mesure du LAI difficile, on parle donc de PAI lorsque toute la surface de la plante est prise en compte dans le calcul.

II.1 Méthodes directes

La méthode destructive permet d'avoir un LAI réel du matériel végétal utilisé. Elle consiste à mesurer directement la surface de chaque feuille par planimétrie ou gravimétrie. La surface au sol étant calculée à partir de la surface d'une parcelle et de la densité de plantation ($\text{surface au sol} = \text{nb arbre} / \text{surface d'une parcelle}$) dans le cas de calcul de LAI d'une parcelle entière.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est souvent lourde à mettre en œuvre, particulièrement quand le matériel végétal étudié est constitué de ligneux. Et sa réalisation implique des prélèvements foliaires, donc la destruction partielle de l'objet.

Dans cette étude, la méthode destructive ne pouvait suffire pour notre campagne de mesure à grande échelle du fait de ses fortes contraintes de réalisation. Elle a donc été utilisée pour calibrer les appareils de mesures indirectes et également pour établir des corrélations indice de végétation calculé par télédétection/LAI.

II.2 Méthodes indirecte

Trois types de méthodes indirectes ont été utilisés dans cette étude, chacune utilisant des instruments optiques différents.

❖ LAI -2000 Plant Canopy Analyser (PCA)

Le LAI est constitué d'une unité de contrôle, et d'un capteur optique (cf. Figure 9). Ce capteur est une lentille « fish eye » à 148° de champ de vision. L'appareil mesure le rayonnement diffus à différents angles de visés (centré sur 7, 23, 38, 53 et 68°). Des mesures successives effectuées au dessus et au dessous de la canopée permettent de calculer l'interception lumineuse et de déterminer le LAI en utilisant un modèle de transfert radiatif des canopées végétales (modèle de Poisson détaillé en Annexe 3).



FIGURE 9 : COMPOSANTS DU LAI PCA DE LI-COR
([HTTP://WWW.LICOR.COM/ENV/PRODUCTS/AREAMETERS/LAI_PCA/2000_INTRO.JS](http://www.licor.com/env/products/areameters/LAI_PCA/2000_INTRO.JS))

Le capteur est sensible à des radiations $< 490\text{nm}$, car la transmittance et la réflectance sont minimums dans cette tranche de longueur d'onde. Au dessus, la réflectance et la transmittance seront mesurées. Chaque cercle correspond à un angle zénithal, représenté ci-dessous en Figure 10.

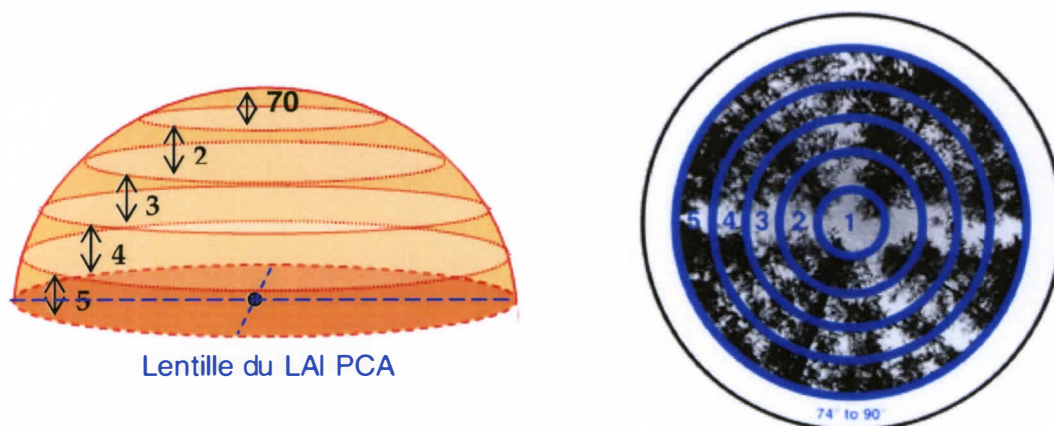


FIGURE 10 : REPRESENTATION DES ANNEAUX DE MESURE DE LA LENTILLE DU LAI-2000 PCA

Les mesures successives en dessus et en dessous du couvert doivent être prises avec un minimum de variation de lumière incidente. Les conditions optimales vont se rencontrer à l'aube et au crépuscule : un ciel dégagé et une lumière diffuse.

Dans le cas de couverts hauts, les mesures du dessus de couvert sont effectuées en terrain dégagé, dans une zone permettant de capter la lumière incidente avec le moins d'obstacles possibles. Plus ce terrain dégagé est éloigné des mesures sous le couvert plus le risque de variation de lumière incidente est élevé.

L'avantage de cet appareil est que la mesure est très rapide. Cependant, le modèle utilisé pour le calcul du LAI est valable pour des couverts uniformes et homogènes, ce qui n'est pas le cas du palmier. Dans le cas des palmiers, il faut tenir compte d'un facteur correctif qui prend en compte le degré d'agrégation des feuilles. Ce facteur sera mesuré à l'aide d'une autre méthode indirecte : la photo hémisphérique.

❖ Photo Hémisphérique

Plusieurs logiciels étaient à notre disposition pour traiter les photos hémisphériques. L'étude de E. Taffureau (2006) sur la comparaison de différents logiciels de traitements de photos hémisphériques montre que la méthode de segmentation utilisée par le logiciel Can_eye (cf. Weiss et al., 2004) pour estimer la fraction de trou est la plus fiable. Il permet en outre de calculer l'effet de l'agrégation du couvert, ou facteur de clumping, important dans le cas du palmier et influant significativement sur le LAI.

Nous avons donc traité les photos à l'aide du logiciel Can_Eye développé par Marie Weiss de l'INRA d'Avignon (UMR1114 Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes). Il a pour vocation de traiter les photos pour calculer des indices caractérisant la canopée tels que le LAI, le fAPAR, la fraction de couvert, le facteur de clumping. Ce logiciel a la particularité de traiter un grand nombre de photos en même temps et a le grand avantage d'être libre et gratuit.

Principe :

La mesure de LAI est basée sur des mesures de 'fréquence de contact' et de 'fréquence de trou'. La fréquence de contact est définie comme la probabilité qu'un faisceau lumineux qui pénètre dans la canopée entre en contact avec un élément de la végétation avant d'atteindre une hauteur de référence, généralement le sol. Inversement, la fréquence de trou est la probabilité que ce faisceau n'entre pas en contact avec un élément de la végétation. Le terme 'fraction de trou' est employé pour caractériser la fréquence de trou dans un domaine donné, comme par exemple une photo hémisphérique. La fréquence de contact est linéairement corrélée avec le LAI. Cependant, cette valeur est très difficile à mesurer sur le terrain. Il est plus aisé de mesurer la fréquence de trou qui est corrélée avec la fréquence de contact d'après un modèle de Poisson. Le détail du modèle et des relations entre les variables définies ci-dessus est détaillé en Annexe 4.

Le logiciel calcule la fraction de trou à partir d'une classification supervisée qui définit les objets de type végétation et non végétation, c'est à dire les 'trous'. On obtient après traitement une estimation du LAI, ainsi qu'une estimation du facteur d'agrégation ou clumping.

❖ Télédétection

L'objectif de l'étude étant de travailler à l'échelle de l'objet palmier, couvrant en moyenne 81 mètres carrés, le choix d'une image à très haute résolution spatiale s'imposait. Le laboratoire a donc programmé une image du satellite Quickbird dans la mesure où il propose un produit conforme à nos besoins. En effet, celui-ci dispose de deux types de capteurs à très haute résolution spatiale, lui permettant d'acquérir les images en deux modes : panchromatique, à 0,6m/pixel, et multispectral, à 2,5m/pixel (cf.

Annexe 3 : DETAIL DU MODELE UTILISE POUR CALCULER LE LAI
AVEC LE LAI-2000 PCA (EXTRAIT DE LA NOTICE TECHNIQUE
[HTTP://WWW.LICOR.COM](http://www.licor.com))



Theory of Operation

Assumptions

The LAI calculations are based on four assumptions about the measured canopy:

- **The Foliage is black.** It is assumed that the below-canopy readings do not include radiation that has been reflected or transmitted by foliage.
- **The foliage elements are small compared to the area of view of each ring** (see Foliage Size, page 9).
- **The foliage is randomly distributed within certain foliage-containing envelopes.** These envelopes might be parallel tubes (a row crop), a single ellipsoid (an isolated bush), an infinite box (turf grass), or a finite box with holes (deciduous forest with gaps).
- **Foliage is azimuthally randomly oriented.** That is, it does not matter how the foliage is inclined, but the leaves should be facing all compass directions.

No real canopy conforms exactly to these assumptions. Foliage is never random, but is clumped along stems and branches, and is not "black". Many species exhibit some degree of heliotropism, which violates the azimuthal randomness assumption. However, many canopies can be considered random, and living foliage does have low transmittance and reflectance below 400 nm.

Offsetting errors are common, such as when leaves are grouped along stems (transmittance higher than the random model), but are still preferentially positioned to minimize mutual shading (transmittance lower than the random model). In practice, most violations of the assumptions can be overcome with the proper measurement technique, and the model still works well even if all the assumptions are not met exactly.

Gap Fractions

Canopy structure information, including amount and orientation of foliage, can be estimated from measurements of gap fractions. The gap fraction of a canopy is the fraction of view in some direction from beneath a canopy that is not blocked by foliage. The fractional sunleak area is equivalent to the gap fraction in the solar direction. The gap fraction technique is at present the most powerful and practical tool available for indirect sensing of canopy structure. It can be applied not only to continuous canopies, but also to settings which can be modeled by discrete, foliage-containing envelopes, such as row structure or individual trees.

Gap fractions have been measured using fisheye photographs (Anderson 1971, Bonhomme and Chartier 1972), by traversing a sunward-pointed sensor beneath the canopy (reviewed by Ross 1981, Lang et al 1985, Perry et al 1988), by linear light sensors (Walker et al 1988, Chen and Campbell 1988), and by pushing metal probes through the canopy (Warren Wilson and Reeve 1959).

Mathematical techniques for deducing foliage density and angle distribution from measurements of gap fraction (or contact frequency) have been presented by many authors, including Warren Wilson and Reeve (1959), Miller (1963, 1967), Philip (1965), Ross (1981), Anderson (1984), Lang et al (1985), Lang (1986, 1987), Perry et al (1988), and Norman and Campbell (1989).

Leaf Area Index

The optical sensor of the LAI-2000 consists of a fisheye lens and an optical system. The fisheye lens "sees" a hemispherical image, which the optical system focuses onto a photodiode detector made up of five concentric rings. Each detector ring views a different portion of the canopy or sky centered on one of the 5 view angles. The fraction of diffuse incident radiation that passes through a plant canopy, for each view angle, can be expressed as

$$\frac{\text{Diffuse intensity below the canopy at view angle } \theta}{\text{Diffuse intensity above the canopy at view angle } \theta} = T(\theta)$$

$T(\theta)$ is the probability of diffuse non-interception for a given view angle (ring) called the *gap fraction*; it is analogous to a transmittance. $T(\theta)$ depends on foliage orientation, foliage density and pathlength through the canopy in the same way that light transmittance through a solution depends upon extinction coefficient, absorber concentration and pathlength, i.e. according to the Beer-Lambert Law,

$$T(\theta) = \exp(-G(\theta) \mu S(\theta))$$

or

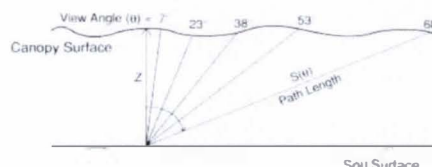
$$-\ln T(\theta) = G(\theta) \mu S(\theta) \quad (1)$$

where $G(\theta)$ is the fraction of foliage projected toward angle θ , μ is the foliage density (m^2 foliage per m^2 canopy; analogous to concentration) and $S(\theta)$ is the pathlength through the canopy for each view angle, θ . Miller gives an exact solution for foliage density, μ :

$$\mu = -2 \int_0^{\pi/2} \frac{\ln T(\theta)}{S(\theta)} \sin \theta d\theta \quad (2)$$

The ratio $\ln(T(\theta)) S(\theta)$ is called the contact number (m^{-1}). Equation 2 can be applied to any general canopy shape (rows, isolated plants, etc.) as long as $S(\theta)$ is known. For full cover canopy of height z , $S(\theta) = z/\cos \theta$ and $\text{LAI} = \mu \cdot z$, so equation 2 may be rewritten

$$\text{LAI} = -2 \int_0^{\pi/2} \ln(T(\theta)) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (3)$$



The LAI-2000 implements this equation by numerical integration using the 5 measured angles. The detector geometry fixes the value of $\sin \theta d\theta$ for each ring allowing computation of a constant weighting factor $w(\theta_i)$ for each ring. The numerical integration then becomes quite simple

$$\text{LAI} = -2 \sum_{i=1}^5 \ln(T(\theta_i)) \cos \theta_i w(\theta_i) \quad (4)$$

where the subscript i refers to each of the detector rings with view angle centered at θ_i .

Foliage Orientation

The LAI-2000 calculates mean tilt angle (MTA) after Lang (1986). Alternative orientation information such as the fraction of area in various angle classes can be calculated using the C2000 software (included).

ANNEXE 4 : Modélisation de la fraction de trou avec le logiciel Can_Eye
(extrait de la notice : http://www.avignon.inra.fr/can_eye/)

Annexe).

L'image a été acquise par DigitalGlobe le 8 juin 2008 avec l'instrument Quickbird/BHRC-60 (Quickbird Ball High Resolution Camera 60), dans les 4 canaux spectraux disponibles (bandes 1 à 4 respectivement : bleu, vert, rouge et proche-infrarouge cf. Annexe 5).

Meilleure qu'une première tentative d'acquisition en avril 2008, sur laquelle l'essentiel de la plantation se trouvait sous les nuages ou sous leur ombre, ou encore sous une épaisse brume laissant apparaître les structures mais perturbant complètement le signal radiométrique, cette image n'est malheureusement pas exempte de nuages. En raison des difficultés à acquérir une image totalement découverte sous les tropiques, et le risque de ne pas en avoir de meilleure avant la fin du projet, il nous a fallu l'accepter. Toutefois, ayant été acquise après la campagne de mesures, un grand nombre de pointes échantillonnées sur le terrain se retrouve malheureusement dans des zones inexploitable de l'image (nuage ou ombre de nuage).

III Etablissement des protocoles

III.1 Méthode directe ou destructive

Le détail du protocole réalisé est présenté en Annexe 6.

Choix des arbres : Nous avons fait des mesures sur un maximum les 4 types de matériel végétal et sur le maximum d'âge représentés (20 années de plantation différentes), soit au terme de la mission de terrain 32 arbres au total :

Matériel végétal	Nb d'arbres mesurés	Nb d'années de plantation mesurées / Nb d'années total
Socfindo	16	9 années / 13
Marihat	10	5 années / 7
Dami	4	2 années / 4
Costa-Rica	2	1 année / 1

TABLEAU 1 : RECAPITULATIF DES ARBRES MESURES PAR LA METHODE DESTRUCTIVE

Des protocoles de méthodes destructives pour évaluer le LAI d'une parcelle existent déjà. Cela consiste à mesurer au planimètre certaines feuilles du palmier, et grâce à des corrélations établies, nous pouvons en déduire la surface totale de feuille totale (Sf). Cette surface est multipliée par le nombre (n) d'arbre présents dans le bloc. Ce produit une fois ensuite rapportée à la surface du bloc (Sb) donne le LAI de l'arbre.

$$LAI = \frac{Sf \times n}{Sb}$$

Cependant le LAI est par définition la surface foliaire rapportée à la surface au sol. Or dans le précédent calcul, la surface au sol utilisée est la surface allouée à l'arbre dans le bloc (surface de la parcelle divisé par le nombre d'arbres). Or les arbres adultes ont des palmes qui s'entrecroisent et la surface foliaire s'étale sur une surface plus large que celle prédéfini

par la dimension du bloc. Nous avons donc utilisé comme surface au sol la surface projetée de la canopée de l'arbre, c'est à dire l'étendue de la canopée projetée sur un cercle au sol.

Le protocole est constitué de 6 étapes :

① **Estimer la surface projetée de la canopée** : Deux mesures sont nécessaires au calcul : périmètre du stipe (P_s) et distances du stipe à l'extrémité des feuilles (D_s) (on mesure environ 8 longueurs de palme qui sont ensuite moyennées) (cf. Figure 11). On mesure également le nombre de feuilles (f) qui nous servira plus tard pour le calcul de LAI ainsi que la hauteur de l'arbre (h) pour avoir complété la structure de l'arbre.

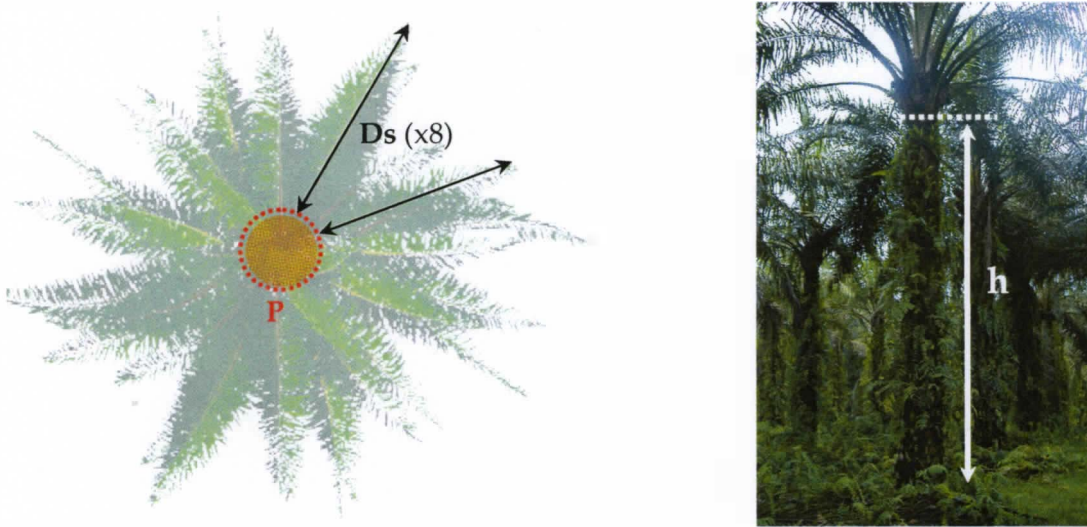


FIGURE 11 : MESURE DES MENSURATIONS DE L'ARBRE

Calcul du rayon du stipe : $R_s = P_s / 2\pi$

Calcul de la surface projetée (A_p) :

$$\text{Aire d'un cercle : } A = \pi * (R)^2$$

$$\text{Aire projetée : } A_p = \pi * (D_s + P_s / 2 / \pi)^2 \quad [1]$$

② **Sélection et découpe des feuilles** : Nous avons choisi de découper trois feuilles de l'arbre de différents âges de manière à moyenner la surface des feuilles obtenues. . Ainsi en multipliant par le nombre de feuilles totales de l'arbre, on obtient une approximation de la surface foliaire de l'arbre. Cette estimation est assez représentative de la réalité dans la mesure où les feuilles présentent une surface quasi constante.

③ **Echantillonnage des folioles** : Nous collectons sur chacune des trois feuilles découpées une foliole sur six tout le long de la feuille et ce de chaque côté en prenant soin de ne pas les mélanger. Chaque foliole est identifiée par son numéro (la première foliole est celle située à la base du rachis) et sa position sur le rachis mesuré au décimètre (cf. Figure 12 et Figure 13).



FIGURE 12 : IDENTIFICATION DU NUMERO DES FOLIOLES SUR LE RACHIS



FIGURE 13 : DECOUPE DES FOLIOLES (1 FOLIOLE SUR 6)

④ **Mesure des folioles** : Initialement nous devions mesurer chaque foliole au planimètre. Cependant, l'appareil qui nous a été fourni était défectueux. La forme des folioles a été paramétrée par Tailliez et Koffi (1992) et confirmée par Julia (2007) : elles peuvent être divisées en 5 trapèzes. La longueur de la foliole est mesurée, ainsi que la largeur maximum. Quatre largeurs sont ensuite tracées de part et d'autre de la largeur maximum (100%) et constitueront les bases des 5 trapèzes. Ces largeurs ont des valeurs spécifiques : sur la **Figure 14** de gauche à droite, on a une largeur mesurant 60% de la largeur maximum, puis 90 %, 80% et 50%. Chaque longueur entre largeurs spécifiques (de A à E sur la **Figure 14**) est mesurée et permettra de calculer l'aire de chaque trapèze

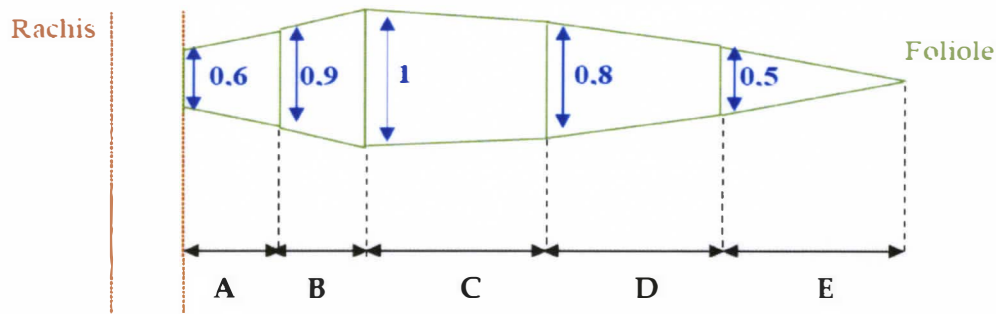


FIGURE 14 : MESURES CARACTERISTIQUES DE LA FOLIOLE

$$\text{Surface foliole} = \frac{1}{2} * ((0,6*W_{\text{max}}+0,9*W_{\text{max}})*A + (0,9*W_{\text{max}}+W_{\text{max}})*B + (0,8*W_{\text{max}}+W_{\text{max}})*C + (0,5*W_{\text{max}}+0,8*W_{\text{max}})*D + (0,5*W_{\text{max}})*E)$$

Dans un premier temps nous avons mesuré toutes les largeurs et longueurs spécifiées sur toutes les folioles échantillonnées soit une moyenne de 44 folioles par palme. Ce travail prend un temps considérable mais a pu être facilité par l'utilisation de corrélations que nous avons établies entre l'aire de la foliole et le produit de la longueur par la largeur maximum de la foliole (cf. Figure 15). En effet, cette corrélation linéaire nous permet de ne pas mesurer tous les trapèzes de la foliole mais uniquement les largeurs maximum et longueurs, comme préconisé par Julia (2007).

Corrélation linéaire de P et l'aire des folioles

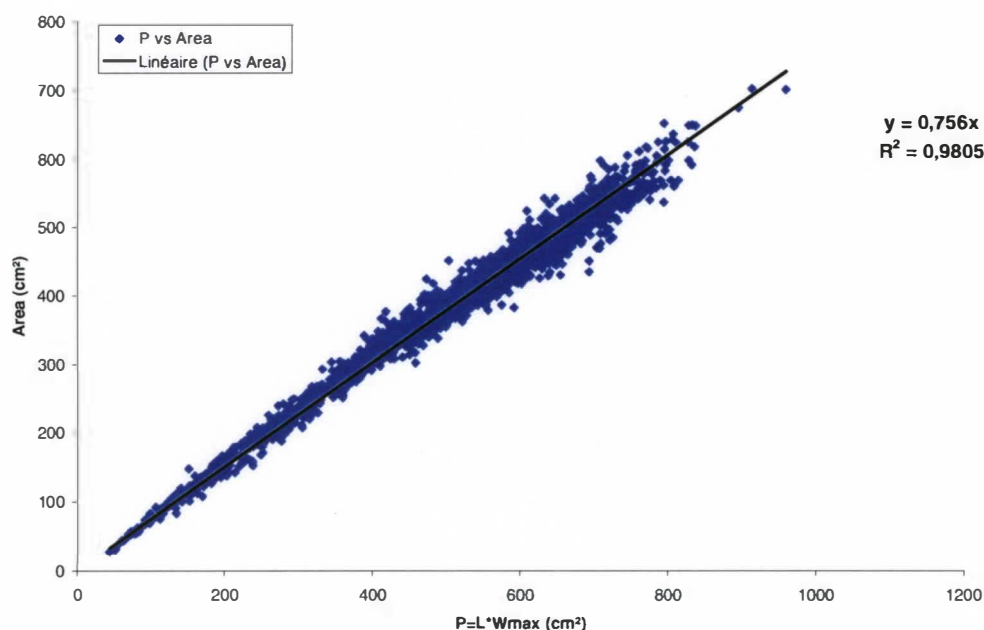


FIGURE 15 : CORRELATIONS LINEAIRE DE PRODUIT P ET DE L'AIRE FOLIOLAIRE SUR TOUS LES PALMIERS MESURES PAR LA METHODE DESTRUCTIVE

A chaque bloc de palmier, nous avons échantillonné trois palmes sur deux arbres faisant partie du même bloc, donc du même âge et même matériel végétal. Les deux arbres étaient choisis en fonction de leur morphologie et leur contexte les plus différents possible : le premier arbre entouré par exemple d'autres palmiers et peu fourni en palmes, et le deuxième situé à l'inverse dans une trouée et très fourni en palmes. Ceci répondait toujours à l'optique de mesurer le plus grand nombre de configurations différentes.

⑤ Estimation de la surface foliaire et calcul du LAI :

Nous avons dans un premier temps interpolé la surface des folioles en fonction de la position relative sur le rachis. Entre chaque point présenté sur le graphe ci dessous (cf. Figure 16), il y a 5 folioles non échantillonnées, l'aire de ces folioles est calculée en interpolant une droite entre chaque couple de deux points consécutifs de manière à avoir l'aire de toutes les folioles de chaque feuille.

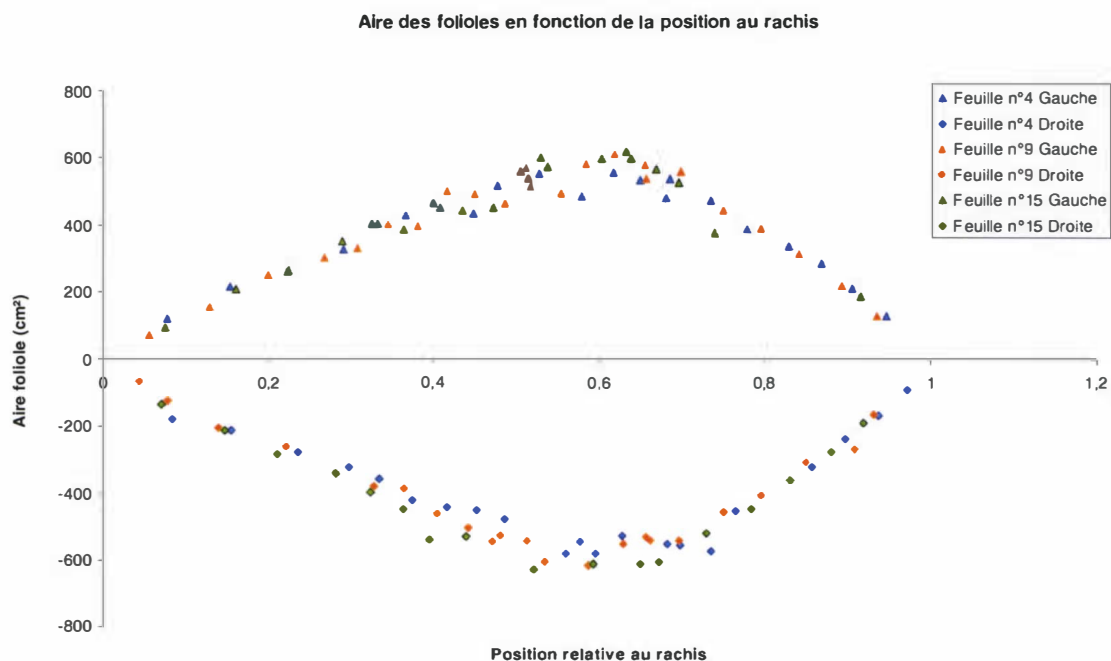


FIGURE 16 : EXEMPLE DE GRAPHIQUE DE L'AIRES DES FOLIOLES EN FONCTION DE LEUR POSITION RELATIVE SUR LE RACHIS SUR UN PALMIER SOCFINDO 1992

Cela nous permet d'avoir la surface foliaire de chaque palme mesurée en additionnant les aires de folioles de chaque paire de demi-palmes.

$$\sum S_{\text{folioles}} (\text{feuille n}^\circ 4) = S (\text{feuille n}^\circ 4)$$

Ensuite nous multiplions la surface foliaire moyenne (issue de la moyenne des trois palmes) par le nombre de palme de l'arbre. Nous obtenons la surface foliaire de l'arbre.

$$S_{\text{foliaire}} \text{ moyenne d'une palme} = 1/3 * (\sum (\text{feuille n}^\circ 4, \text{n}^\circ 9, \text{n}^\circ 15))$$

$$S_{\text{foliaire}} \text{ de l'arbre} = S_{\text{foliaire}} \text{ moyenne d'une palme} * f$$

f étant le nombre de feuilles portées par l'arbre

Cette surface foliaire rapportée à la surface au sol nous donne le LAI.

$$\frac{S_{\text{foliaire}} \text{ de l'arbre}}{S_{\text{sol}}}$$

LAI =

Nous avons vu précédemment que deux définitions de la surface au sol vont être testées. Une en calculant la surface au sol standard (S_a), qui consiste à calculer la surface allouée à l'arbre : $S_a = S_{\text{bloc}} / \text{Nb}_{\text{palmiers}}$. L'autre définition de la surface au sol est la surface projetée (S_p) de la canopée dont la formule a été explicitée précédemment $S_p = A_p [1]$.

Nos deux formules du LAI sont donc les suivantes :

$$\text{LAI Standard} = \frac{Sf \times n}{\text{Surface allouée à l'arbre (Sa)}} \rightarrow Sa = \frac{\text{Surface de la parcelle}}{\text{Nb arbres de la parcelle}}$$
$$\text{LAI 1} = \frac{Sf \times n}{\text{Surface projetée de l'arbre (Sp)}} \rightarrow Sp = \pi \times \left(Dm + \frac{P}{2 \times \pi} \right)^2$$

*rayon total du centre
du stipe à l'extrémité
de la palme*

Dm : Distance moyenne (sur environ 8 mesures tout autour de l'arbre) du stipe à l'extrémité de la palme

P : Périmètre du stipe

III.2 Méthodes indirectes

❖ A l'échelle de l'individu²

LAI-2000 PCA

Objectif : Avoir des mesures de LAI sur un maximum d'arbres afin de les mettre en relation par la suite avec l'indice de végétation calculé à l'aide de la télédétection. Le maximum de variabilité doit être mesuré et sur la totalité de la surface de la plantation de manière à obtenir un échantillon le plus large donc le plus représentatif possible.

Principe : Deux LAI sont nécessaires, un qui va mesurer le rayonnement lumineux incident global dans un espace ouvert (à au moins $D = 3,5 \times$ hauteur du palmier) et un autre appareil porté par l'expérimentateur qui prendra les mesures du rayonnement lumineux sous la canopée (cf. Figure 17).

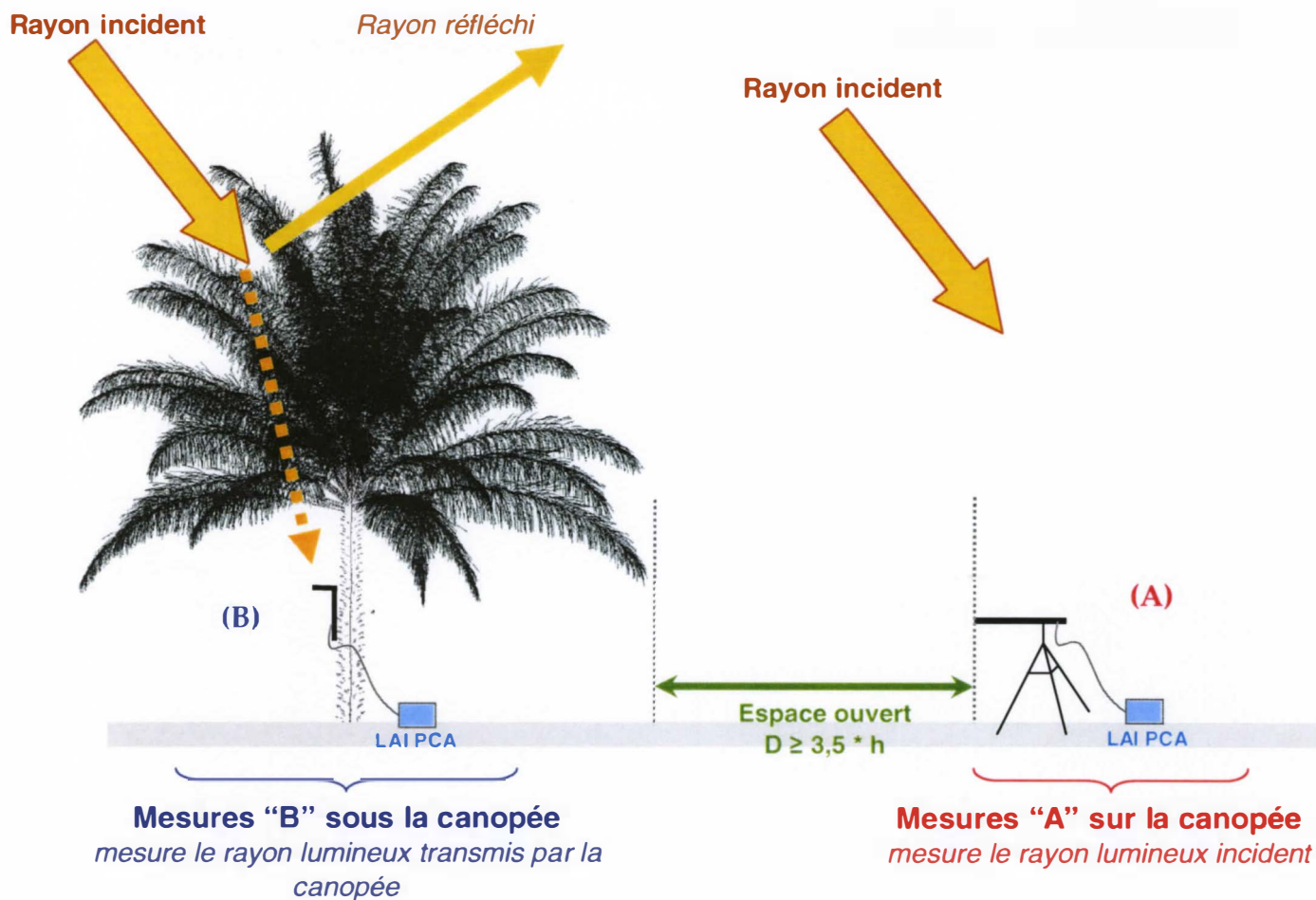


FIGURE 17 : SCHEMA DE LA MESURE DU LAI D'UN ARBRE AU LAI-2000 PCA

Les mesures sous la canopée sont effectuées autour de l'arbre de manière à prendre en compte la totalité de la surface foliaire de l'arbre. Une douzaine de mesures réparties tout autour du stipe sont réalisées. Un cache permettant une ouverture de lentille de 45° est utilisé pour masquer l'impact de l'expérimentateur sur l'enregistrement (cf. Figure 18). La canne portant la lentille est disposée au plus proche du stipe pour bien prendre en compte la base des feuilles. Ensuite l'expérimentateur prend une série de 12 mesures.

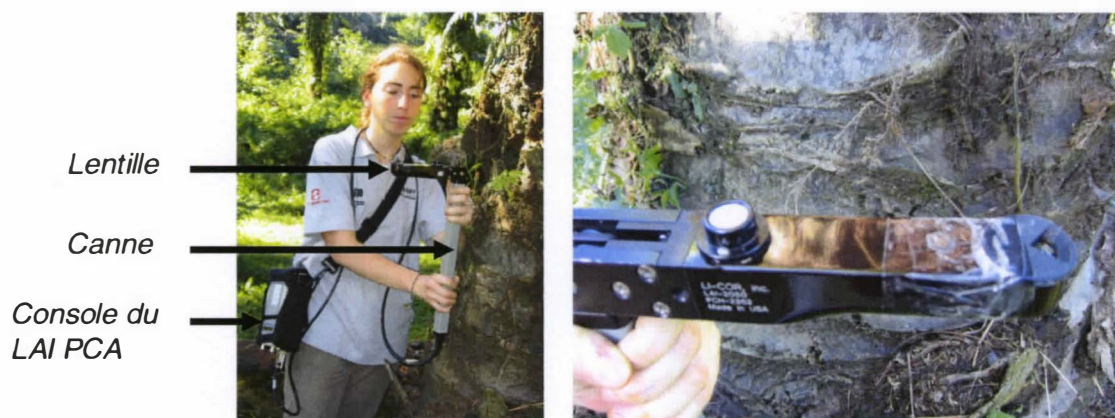


FIGURE 18 : MESURES AU LAI-2000 PCA SOUS LA CANOPEE

Les données ainsi enregistrées sont traitées à l'aide du logiciel LAI-2000 File Viewer 1.09.

Photographie hémisphérique

Le protocole de la photographie hémisphérique est très simple : 8 photographies sont prises tout autour du stipe de l'arbre. L'appareil doit être positionné horizontalement, la lentille orientée vers le ciel pour prendre un cliché de toute la canopée. La lentille Fish-eye prend un angle de vue de 360° (cf. Figure 19).

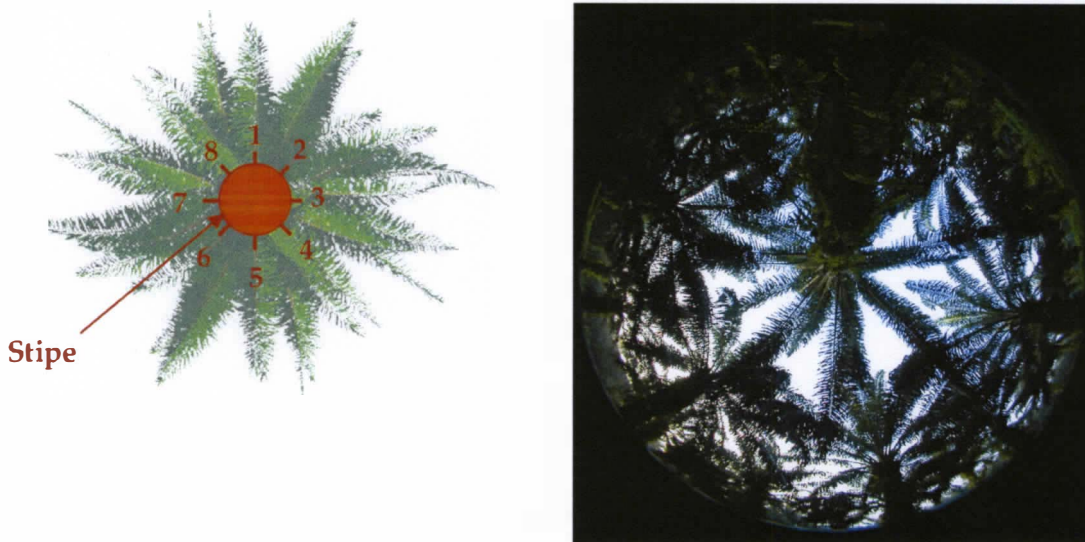


FIGURE 19 : PRISE DE PHOTOGRAPHIE HEMISPHERIQUE AUTOUR DU STIPE ET EXEMPLE DE PHOTOGRAPHIE

❖ A l'échelle du bloc : les transects

Le LAI a été estimé par méthode indirecte à l'échelle du bloc. Le bloc est une entité physique séparée par quatre routes de la plantation et comportant le même matériel végétal et de même année de plantation pour tous les arbres. Le LAI a été estimé par deux méthodes indirectes : LAI-2000 PCA et appareil photo hémisphérique. A chaque point de mesure décrit ci après, nous avons fait une mesure avec le LAI-2000 PCA et pris une photo hémisphérique.

Les protocoles existant de mesure de LAI global ne sont pas adaptés à notre objet d'étude du fait de l'arrangement des palmiers dans l'espace. Afin de nous affranchir des effets de rang des blocs de palmiers, notre cadre de mesures doit prendre en compte tous les types de configuration : dans l'allée entre deux rangées d'arbres où les trous de canopée sont importants, sous les arbres où la densité foliaire est élevée, etc.... De plus, la canne de l'instrument est équipée d'un cache qui laisse la lentille capter les rayons sur une ouverture à 90°, afin de s'affranchir de la présence de l'expérimentateur. Ainsi, nous avons imaginé et testé quatre types de transects (tous les schémas explicatifs des méthodes de transect sont en 7).

Les caractéristiques des 4 types de transects sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 2) :

	Estimation des trouées	Mesure tous types de configuration	Nombre de mesures	Temps de mise en œuvre	Difficulté
Z simple	Bonne	Oui	80	90 min	Moyenne
Z enrichi	Bonne	Oui	300	100 min	Moyenne
Square	Très bonne	Non	350	135 min	Forte
Genius	Bonne	Oui	150	90 min	Basse

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES 4 TYPES DE TRANSECTS TESTES

La sélection des types de transect testés a été dictée par des soucis de rapidité et de facilité de mise en œuvre, tout en gardant un bon compromis avec la mesure de la variabilité rencontrée dans le bloc. Les transects en **Z** (« simple » et « enrichi »), les premiers testés, offrent une bonne estimation des trouées et mesurent toutes les configurations possibles : proches des arbres ou éloignés, dans toutes les directions. Le transect « enrichi » est plus complexe du fait de l'acquisition des mesures par la méthode des triangles qui augmentent par la même occasion le nombre de mesures à prendre. Le gros désavantage de ces deux méthodes est la difficulté de maintenir sur le terrain une direction qui traverse un bloc de palmier de part en part. En effet, le sol dans ces blocs est jonché d'embâcles et d'une végétation abondante, il sont traversés de nombreux ruisseaux par-dessus lesquels il faut souvent se risquer à sauter ou obligent à effectuer un détour pour trouver un pont, rendant très difficile la traversée du bloc.

Le « Square transect » est un type de transect communément utilisé pour d'autres espèces végétales. Nous avons donc voulu le tester dans le cas du palmier, mais il s'est avéré très difficile à mettre œuvre : les traversées des blocs dans le sens de la largeur sont très faciles grâce à la présence de chemins d'exploitation, mais quasi impossibles dans le sens de la longueur. De plus, il est très long à mettre en œuvre et les conditions d'éclairement variant très vite sous les tropiques, il était souvent impossible de terminer ce type de transects avant l'apparition des premiers rayons direct.

La solution adoptée finalement correspond à un mélange de plusieurs types de transect permettant de ne garder que les aspects positifs de chacun : il s'agit de suivre les largeurs de blocs facilement praticables en prenant des mesures avec la technique des triangles de manière à prendre en compte toutes les configurations.

Partie 3. Traitements

I Traitement des mesures prises au LAI-2000 PCA LI-COR

Les mesures sont classées et traitées à l'aide du logiciel FV Viewer 2000. Pour chaque mesure du LAI 'below' dites B mesurant le rayon lumineux sous la canopée, on associe une mesure du LAI 'above' dites A mesurant le rayon lumineux incident global. A chaque mesure B, une mesure A est associée (cf. **Figure 20**). Chaque couple de mesures A/B doit être le plus proche possible dans le temps, ce qui est possible grâce au LAI enregistrant les mesures A toutes les 15 secondes.

	B						
	FILE	DATE	TIME	DIV	PALM	LAI	
	1	26 avr.	06:27:40	4B4	GTRANS	0.00	
	ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00	
	CNTCT#	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	STDDEV	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670	
	GAPS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	B 2	06:27:48	0.374	1.163	0.422	0.771	0.590
	B 4	06:28:02	0.439	1.272	0.211	0.511	0.228
	B 6	06:28:16	0.585	0.205	0.402	1.007	1.709
	B 8	06:28:28	0.203	1.044	1.118	1.153	0.328
	B 10	06:29:44	0.447	0.405	1.260	0.795	0.441
	B 12	06:29:59	0.552	0.994	0.623	0.593	0.333
	B 14	06:30:16	0.171	0.597	1.282	1.187	0.725

	A						
	FILE	DATE	TIME	CALIB	CEMAG	LAI	
	1	26 avr.	06:02:44	FOOT	D4	0.00	
	ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00	
	CNTCT#	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	STDDEV	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670	
	GAPS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	A 1	06:10:01	0.768	0.847	0.942	1.033	1.097
	A 2	06:10:16	0.798	0.878	0.980	1.078	1.132
	A 3	06:10:31	0.828	0.904	1.010	1.113	1.181
	A 4	06:10:46	0.859	0.934	1.048	1.158	1.215
	A 5	06:11:01	0.859	0.953	1.071	1.188	1.253
	A 6	06:11:16	0.919	0.980	1.109	1.234	1.310
	A 7	06:11:31	0.919	1.018	1.147	1.276	1.348

	C						
	FILE	DATE	TIME	DIV	PALM	LAI	
	1	26 avr.	06:27:40	4B4	GTRANS	4.19	
	ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00	
	CNTCT#	2.780	2.261	2.048	-1.000	-1.000	
	STDDEV	0.834	0.831	0.601	-1.000	-1.000	
	DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670	
	GAPS	0.061	0.086	0.074	0.000	0.000	
	A 0	06:27:48	5.544	5.914	6.489	7.833	9.120
	B 2	06:27:48	0.374	1.163	0.422	0.771	0.590
	A 0	06:28:02	5.625	6.018	6.622	7.992	9.265
	B 4	06:28:02	0.439	1.272	0.211	0.511	0.228
	A 0	06:28:16	5.710	6.150	6.771	8.151	9.444
	B 6	06:28:16	0.585	0.205	0.402	1.007	1.709
	A 0	06:28:28	5.807	6.265	6.901	8.305	9.644
	B 8	06:28:28	0.203	1.044	1.118	1.153	0.328
	A 0	06:29:44	6.305	7.001	7.782	9.280	10.68
	B 10	06:29:44	0.447	0.405	1.260	0.795	0.441
	A 0	06:29:59	6.422	7.163	7.964	9.494	10.94
	B 12	06:29:59	0.552	0.994	0.623	0.593	0.333
	A 0	06:30:16	6.590	7.355	8.185	9.751	11.26
	B 14	06:30:16	0.171	0.597	1.282	1.187	0.725

FIGURE 20 : CALCUL DU LAI A PARTIR DES DONNEES LA-2000 PCA

Le logiciel utilise ensuite un modèle de Poisson pour calculer l'interception lumineuse puis le LAI. Le détail des opérations est présenté en Annexe 3.

II Traitements des photos hémisphériques

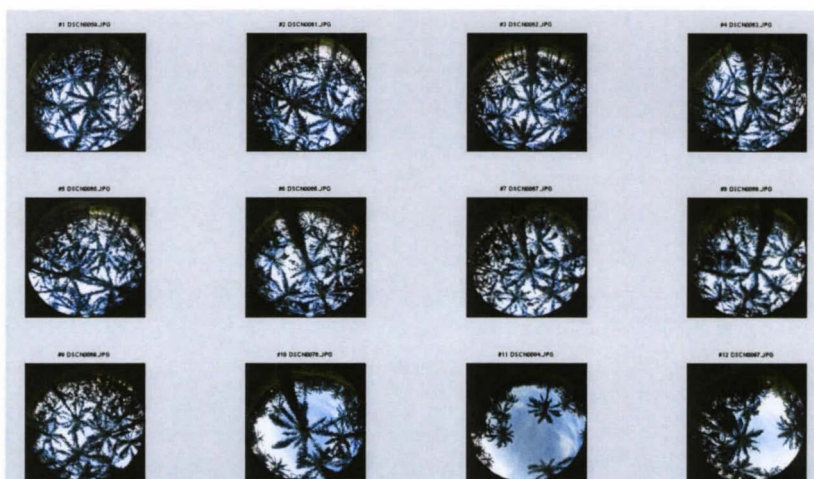
Nous avons des photographies hémisphériques provenant des transects effectués, des arbres individuels mesurés aléatoirement et des arbres individuels ayant subi la méthode destructive. Dans les trois cas, le principe de traitement est identique.

Le calcul de LAI est basé sur l'estimation de la fraction de trou du couvert calculé à partir d'une classification binaire des images entre Ciel/ Végétation chlorophyllienne pour chaque photo hémisphérique. Le traitement se fait en quatre étapes :

① Choix des photos à traiter :

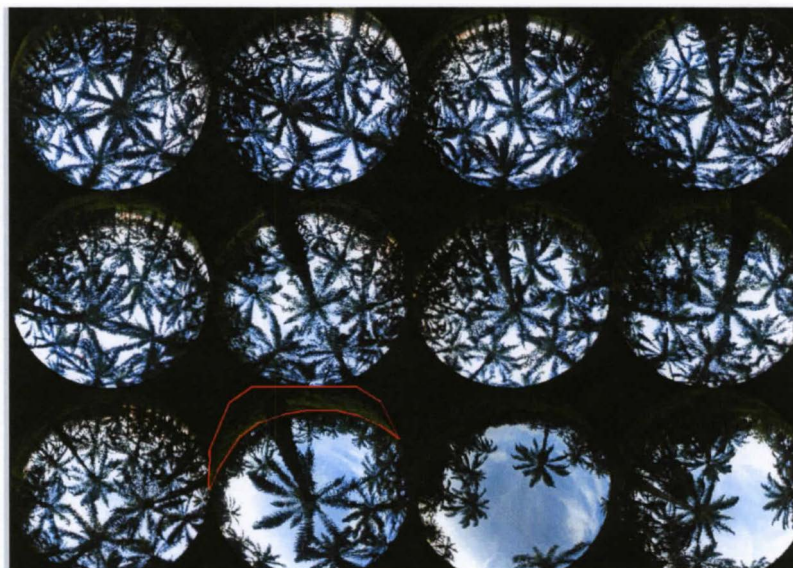
Il est possible de traiter 12 photos à la fois. Cela facilite le calcul du LAI pour les blocs de palmiers constitués de 60 photos minimum et 24 photos pour les palmiers individuels

Il faudra donc réaliser en moyenne 5 fois l'ensemble des étapes pour les transects et 2 fois pour les arbres individuels.



② Application de masques :

L'application de masque permet de corriger des petits artefacts de manipulations de l'appareil tels que la présence de bande enherbé sur l'image du fait d'une photo mal centrée (exemple de gauche), ou de goutte d'eau sur la lentille qui altèrent le rayonnement et déforment l'image.

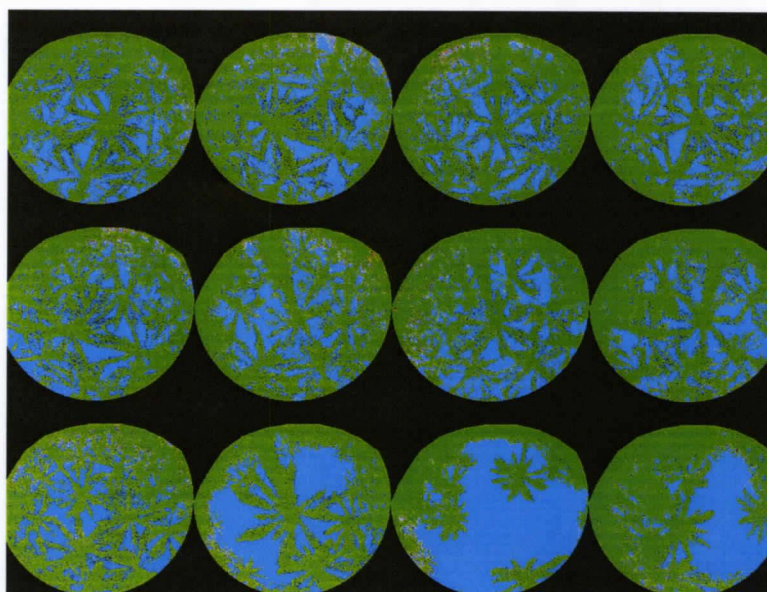


③ Classification :

La classification est réalisée en affectant chaque couleur de pixel à une classe (ciel ou végétation). Cette classification est très subjective et il est parfois malaisé de déterminer l'appartenance d'une couleur à l'une ou l'autre classe.

La qualité des photos est ici déterminante, puisqu'une surexposition a tendance à rendre les limbes des folioles 'transparent'.

De plus dans le cas d'une classification binaire, les troncs sont pris en compte dans la classe 'végétation chlorophyllienne', ce qui signifie que la valeur obtenue en sortie, est une valeur de PAI (et non de LAI).



④ **Compilation des résultats :**

Chaque groupe de 12 photos représentant un bloc ou un arbre individuel est compilé à l'aide d'un logiciel également développé par l'INRA d'Avignon. Il calcule le PAI à partir des fractions de trous de chaque lot de photos obtenus. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3).

AVERAGE BIOPHYSICAL VARIABLES

fCover= 0.894(std=0.969)

	LAI	ALA (°)	Clumping Factor		
			0°	30°	57.5°
Effective	3.1	44	1	1	1
Effective (57.5 °)	3.3	-	-	-	1
True	7.4	60	0.8	0.52	0.81

TABLEAU 3 : EXEMPLE DE TABLEAU DE RESULTATS POUR UN BLOC DE PALMIER 'D5B7' DE TYPE SOCFINDO, ANNEE DE PLANTATION 1996.

Le 'True' LAI est le LAI mesuré et corrigé par le facteur de clumping. Ce dernier est donné à trois angles zénithaux différents. Ils serviront à corriger la valeur donnée par le LAI-2000 PCA. D'après ces résultats, le LAI moyen de bloc de palmier est de 7.4, avec un facteur d'agrégation des feuilles moyen de 0.8 pour un angle zénithal de 0°, 0,52 pour un angle zénithal de 30° et 0,81 à 57,5°. La valeur du ALA (Average Leaf Inclination Angle) est également donné, mais nous ne nous en serviront pas pour cette étude.

D'un point de vue pratique, l'utilisation de Can_eye a le grand avantage de donner le facteur de clumping moyen à trois angles zénithaux différents. Mais le traitement des photographies est très long à mettre en œuvre compte tenu du très grand nombre de photos à traiter.

III Traitements de l'image Quickbird

III.1 Corrections et pré-traitements

L'ensemble des pré-traitements appliqués à l'image Quickbird est présenté sous forme de tableau synthétique en Annexe 8 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ils sont principalement de deux types : radiométriques et géométriques.

III.1.1 Corrections instrumentales

L'image Quickbird brute est composée d'un ensemble de pixels ayant enregistré une valeur d'intensité lumineuse, codée en comptes numériques sur 8 bits. Afin d'analyser les valeurs physiques de luminance de la surface, il est donc nécessaire de transformer ce compte numérique en fonction des paramètres du capteur, pour chaque bande spectrale ainsi que pour le panchromatique. En particulier, les indices de végétation qui seront analysés font intervenir différentes bandes spectrales, qui doivent avoir une valeur cohérente entre elles, donc être ramenée dans la même échelle. Le Logiciel ENVI permet d'appliquer directement le modèle de calibration du capteur Quickbird à partir du fichier de métadonnées associé à l'image acquise, donnant par exemple les paramètres d'angle de prise de vue et d'orientation du capteur, et surtout de gain et d'offset de chaque bande spectrale. Le passage de l'image en réflectance serait un gain supplémentaire car il permettrait de s'affranchir des conditions atmosphériques au moment de la mesure, ce qui n'est pas possible en l'absence de mesures de photométrie le jour de l'acquisition. Toutefois dans le cadre de la présente étude où on ne comparera pas des radiométries issues de différentes sources, et où on étudiera des indices de végétation normalisés, le passage en luminance est suffisant.

III.1.2 Orthorectification

L'image acquise par satellite correspond d'une certaine façon à la projection de la surface réelle dans un plan moyen. Or, en raison de la topographie locale de la zone d'observation, cela engendre une déformation des surfaces et de la métrique en générale, ainsi que des perturbations radiométriques liées aux angles d'orientation de la surface par rapport au capteur. Il est donc nécessaire de corriger l'image de ces effets de topographie. Ne disposant pas d'un modèle numérique de terrain (MNT) sur la plantation, nous avons utilisé les données acquises par le capteur SRTM à bord de la Navette Spatiale Américaine, correspondant à un raster de 90m de résolution spatiale disponible gratuitement sur le site de la NASA (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Toutefois, la résolution étant très faible par rapport à celle de notre image, nous avons dû enrichir ce raster à l'aide d'un maillage de points issus de mesures d'élévation sur le terrain (cf. Figure 21). Ces mesures ont été effectuées à l'aide de deux instrument de positionnement global par satellite (GPS) : un DELL-Axim et Garmin, donnant tous deux des précisions de l'ordre de 5 à 10 mètres en fonction de la configuration des satellites. Cette manipulation n'étant pas la priorité de l'étude, ces mesures ont été

acquises en fin de mission, ce qui explique un maillage non uniforme qui pourrait être amélioré.

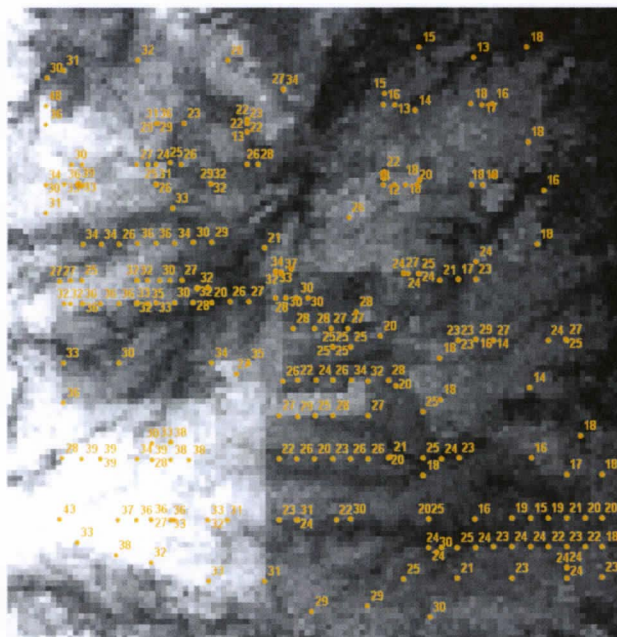


FIGURE 21 : MAILLAGE DES POINTS GPS

On constate effectivement quelques modifications du MNT suite à son enrichissement (cf. Figure 22), mais sa précision pourrait être nettement améliorée avec un maillage de points de terrain plus régulier et plus dense.

L'image « orthoready » étant déjà géoréférencée de manière basique, nous avons donc directement appliqué à l'image l'orthorectification implémentée sous ENVI sur la base de ce MTN enrichi. La pertinence des modifications géométriques sur l'image a été vérifiée en visualisant en trois dimensions l'image corrigée. Aucune aberration, telle par exemple des pics d'altitudes brusques ou des décalages entre l'image d'un cours d'eau et son lit, n'a été remarquée. Le produit obtenu est donc parfaitement superposable avec n'importe quelle données correctement géoréférencée, et comporte une métrique réelles.

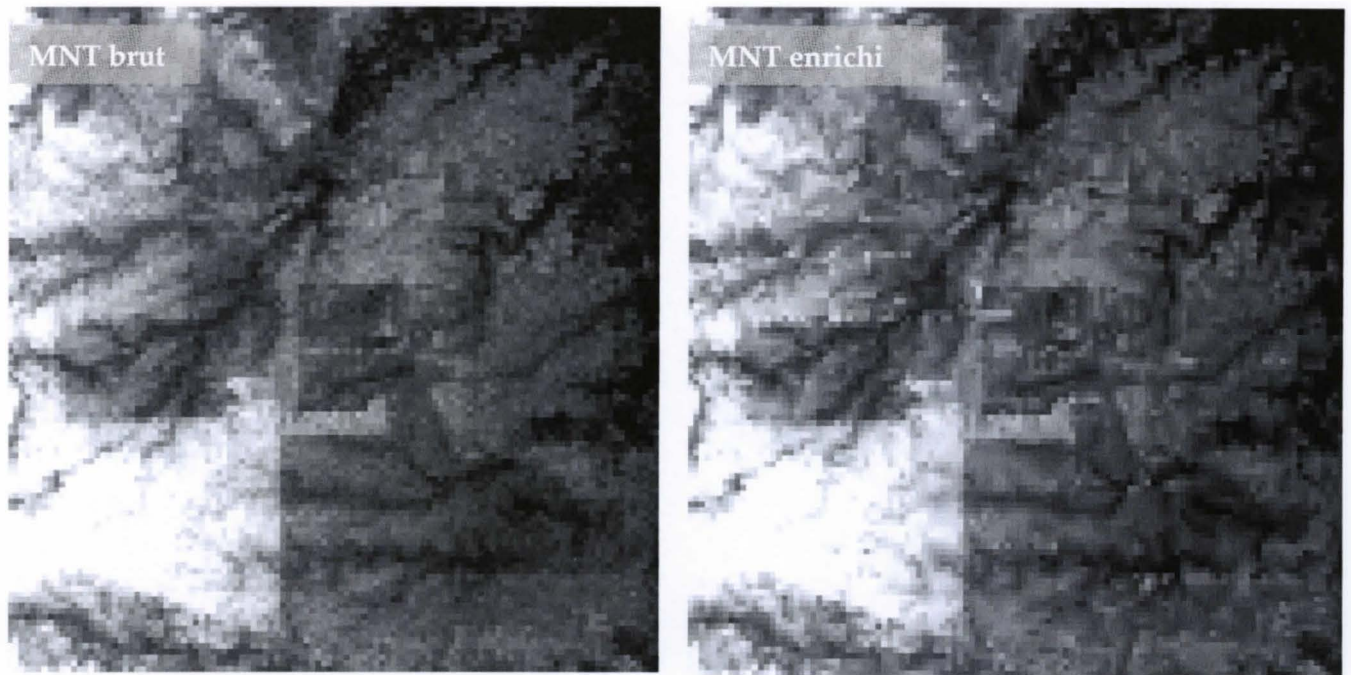


FIGURE 22 : COMPARAISON DES MNT APRES PRISE EN COMPTE DES POINTS GPS

III.2 Calcul du NDVI

III.2.1 *Extraction de la radiométrie au niveau du bloc*

La plantation est divisée en 8 divisions regroupant chacune des parcelles ou bloc de palmiers identifiés avec un numéro unique. Les blocs comportent généralement des palmiers de même matériel végétal et de même année de plantation, cependant certaines exceptions sont rencontrées.

Les parcelles de palmiers ont donc été digitalisées sous forme de couche vectorielle, avec une table attributaire incluant leurs numéros de division et de bloc, identifiés à partir de points GPS relevés sur le terrain ainsi que de cartes de la plantation. Deux difficultés sont rencontrées : la présence de nuages d'une part et le processus d'identification des blocs. La première difficulté a été contournée en ne digitalisant que les blocs comportant ni nuage ni ombre de nuage. Dans l'idéal, il conviendrait de réaliser un masque de ces zones à partir d'un seuillage, opération qui n'a pas été réalisée par manque de temps. L'identification des blocs a été difficile du fait de certaines incohérences dues à l'ancienneté des cartes fournies par PT-SMART, ou des erreurs de labellisation des blocs sur le terrain ainsi que de récentes modifications parcellaires. Les numéros ont donc été validés ou modifiés à partir du SIG de la plantation, créé en 2006 et tenant compte des dernières modifications de parcelles. Au total, 21 blocs ayant fait l'objet de mesures de LAI suivant la méthode des transects ont été ainsi repérés sur l'image.

Afin d'établir des corrélations entre le LAI moyen d'un bloc et son indice de végétation moyen, nous avons ensuite extrait la radiométrie moyenne dans l'infra-rouge et dans le rouge pour chaque bloc digitalisé (cf. Figure 23), en sauvant les statistiques fournies par ENVI au format ASCII.

Padang Halaban - juin 2008
Sumatra, Indonésie

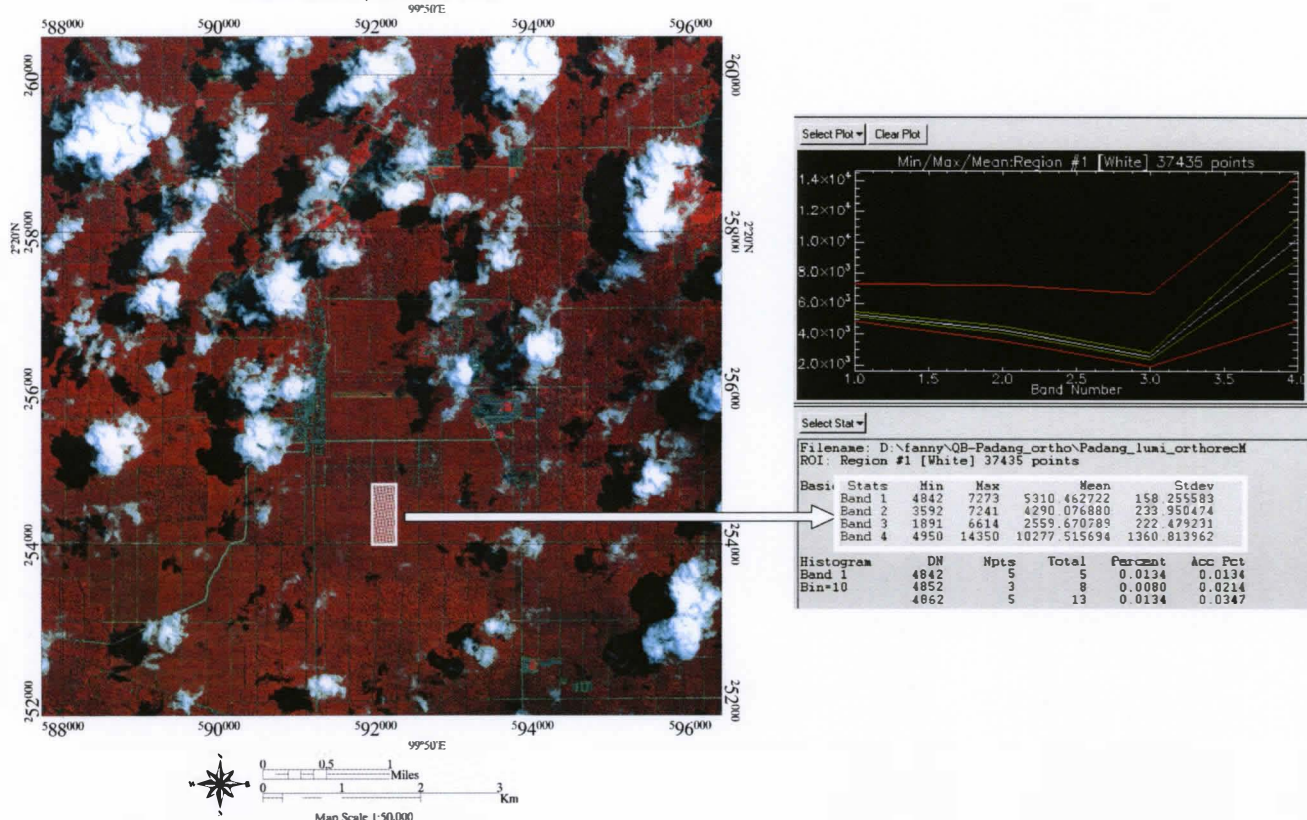


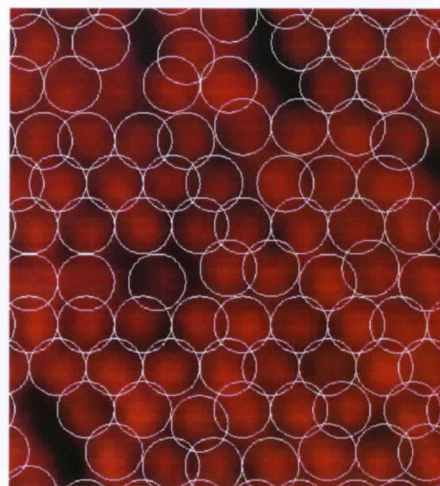
FIGURE 23 : EXTRACTION DE LA RADIOMETRIE MOYENNE D'UN BLOC SUR LES QUATRE BANDES

III.2.2 Extraction de la radiométrie au niveau du palmier

Chaque palmier est théoriquement séparé de ses voisins de 9m, en grille hexagonale régulière. Toutefois, la réalité n'est pas si simple et on constate de grandes variations autour de ce positionnement idéal. Il n'est donc pas possible d'extraire automatiquement une entité palmier sur ces critères. Un palmier a donc été vectorisé sous la forme d'un cercle de 9 mètres de diamètre, ce qui couvre en moyenne l'amplitude de la couronne, à la main et par photointerprétation.

Nous avons utilisé le zoom avec une interpolation 'Optimized Bicubic' pour mieux repérer les entités palmiers sous forme de disque (cf. Figure 24). Cette digitalisation est extrêmement longue et fastidieuse, et relativement subjective quant au choix du centrage du cercle. Des méthodes plus objectives pourraient être développées ultérieurement, reposant par exemple sur l'analyse du profil radiométrique d'un transect à travers un bloc.

Au total, 60 palmiers ayant fait l'objet de mesures de LAI individuel ont été repérés sur l'image et digitalisés. Par ailleurs, pour les tests de cartographie, un bloc de 44 hectares a été entièrement digitalisé de cette manière, à savoir 2748 palmiers.



*FIGURE 24 : EXTRAIT DU ZOOM
UTILISE POUR VECTORISER LES
PALMIERS*

Comme pour les blocs, la radiométrie moyenne de chaque polygone du fichier vectoriel de palmiers individuels est extraite sous ENVI et sauvegardée au format ASCII.

III.2.3 Calcul du NDVI

Pour les palmiers individuels comme pour les blocs de palmiers, les fichiers ASCII comportant la radiométrie moyenne de l'objet sont alors importés sous Excel, dans lequel on calcule le NDVI moyen d'après la formule suivante :

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

Ces valeurs de NDVI sont ensuite réimportées dans la table attributaire du fichier vecteur (fichier .dbf) correspondant.

Pour plus d'aisance, ce fichier vectoriel est alors exporté du logiciel ENVI au format Shapefile, puis travaillé sous le logiciel ArcGIS pour créer les cartes, que ce soit à l'échelle du bloc ou à celle du palmier.

Partie 4. Résultats, interprétation et discussion

I Résultats et interprétation

I.1 Comparaison de deux définitions du LAI sur un arbre individuel

Le graphe ci dessous (cf. Figure 25) nous permet de visualiser la différence entre les deux définitions de calcul du LAI. Il apparaît très clairement que le LAI standard (surface allouée) donne des valeurs de LAI plus grande que le LAI que nous avons définis (surface projetée au sol). Ceci semble logique dans la mesure où la surface allouée à l'arbre est inférieure à la surface projetée de l'arbre.

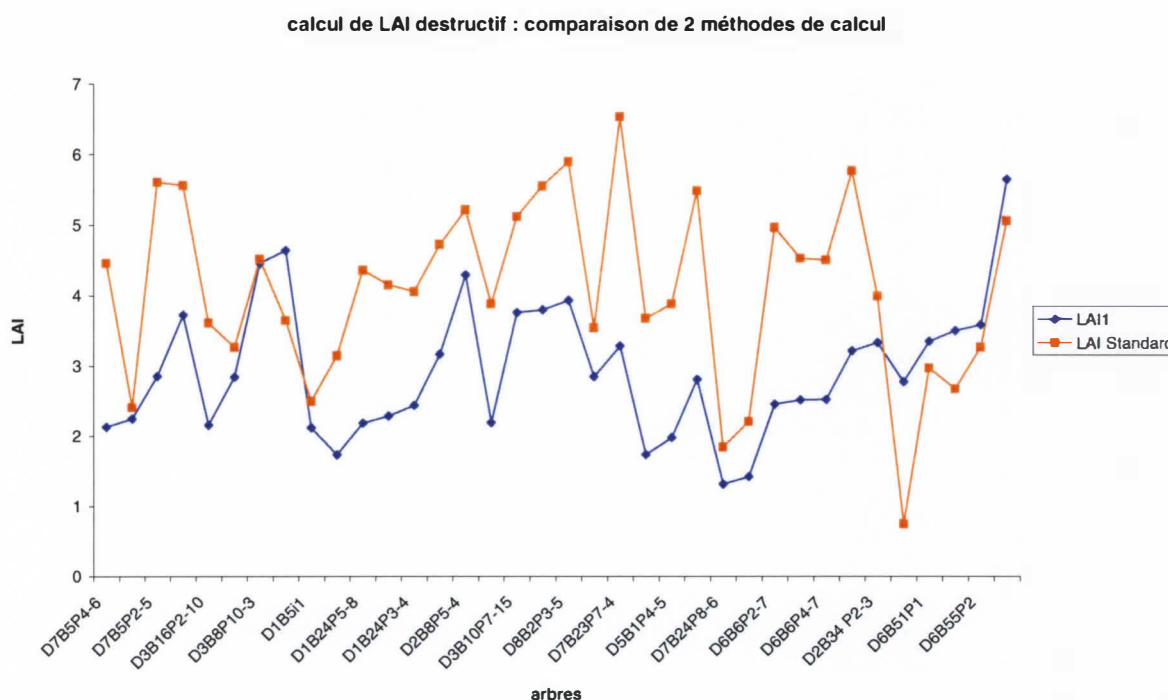


FIGURE 25 : COMPARAISON DE DEUX DEFINITIONS DU LAI SUR LA METHODE DESTRUCTIVE

Afin de savoir quelle formule de LAI est la plus adaptée, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre le LAI destructif et le LAI obtenus avec le LAI-2000 PCA et la photo hémisphérique (cf. Tableau 4). Ces corrélations sont effectuées d'une part avec le LAI Standard (colonne de gauche du tableau) et d'autre part avec le LAI 1 (colonne de droite). Le 'LAI-2000 corrigé' est le LAI obtenu de l'appareil PCA de LI-COR corrigé par le facteur de clumping calculé après traitement des photos hémisphériques.

CORRELATIONS			
LAI Standard vs LAI 1	0.44	LAI 1 vs LAI 1	0.44
LAI Standard vs PHE	0.052	LAI 1 vs PHE	0.25
LAI Standard vs LAI-2000 brut	-0.19	LAI 1 vs LAI-2000 brut	0.37
LAI Standard vs LAI-2000 corrigé	-0.34	LAI 1 vs LAI-2000 corrigé	0.23

TABLEAU 4 : CORRELATIONS ENTRE LAI DESTRUCTIF ET LAI INDIRECT

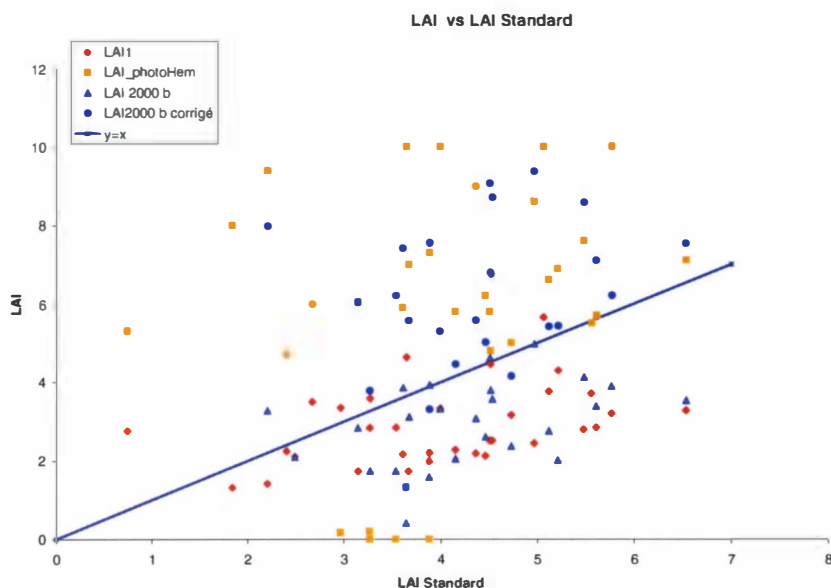
Il semble que les valeurs de LAI sont corrélées plus fortement avec le LAI Standard qu'avec le LAI 1 (corrélations fortes représentées en rouge dans le tableau). A première vue, la définition du LAI standard est plus corrélée avec les valeurs de LAI obtenus avec les deux autres techniques. De plus, l'ordre de grandeur semble plus cohérent avec ce qu'on obtiendrait théoriquement sur l'objet palmier (Julia C., 2008).

Le LAI Standard semble donc plus adapté à notre cas d'étude que le LAI 1.

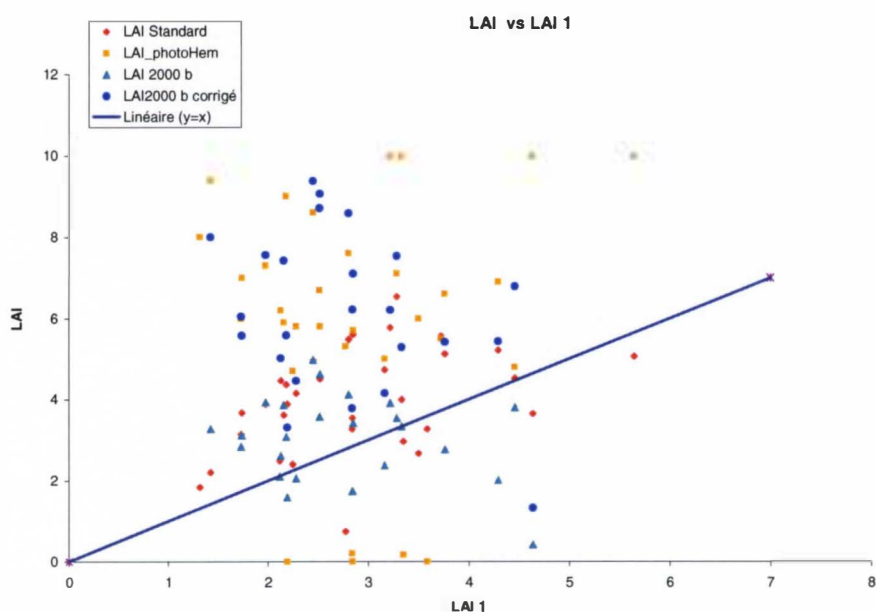
1.2 Comparaison des trois méthodes de calcul sur les arbres individuels

Nous avons testé les trois méthodes de calcul du LAI, destructif LAI-2000 PCA et Photo hémisphérique, sur 36 arbres. Notre référence du LAI est la valeur calculée à partir de la méthode destructive, qui même s'il s'agit d'une approximation, se rapproche le plus de la valeur réelle.

Les deux graphiques suivants (cf. Figure 26) permettent de visualiser le nuage de points de LAI en fonction de la méthode d'estimation utilisée. En abscisse, nous avons les valeurs de LAI issus de la méthode destructive (LAI standard ou LAI1). Les LAI obtenus avec les méthodes indirectes sont représentées en ordonnée. La droite représente le cas théorique où les LAI de la méthode destructive correspondent parfaitement aux LAI mesurés de façon indirecte.



La méthode de la photographie hémisphérique présente la plus grande dispersion avec des amplitudes fortes de LAI. La même tendance est observée avec le LAI-2000 corrigé. Le nuage de points issus du LAI 1 et du LAI-2000 non corrigé sont les moins étalés autour de la droite, on remarque que dans les deux cas le LAI est sous estimé.



Les tendances observées dans ce cas sont sensiblement les mêmes, avec un étalement le long de la droite moins marqué, et une dispersion des valeurs très marquées particulièrement pour le LAI issu de la photo hémisphérique.

FIGURE 26 : GRAPHES REPRESENTANT LES NUAGES DE POINTS DE LAI CALCULES A PARTIR DES METHODES DIRECTES ET INDIRECTES

Dans les deux cas il semble que la méthode de la photographie hémisphérique ne soit pas très stable pour estimer le LAI. Les amplitudes de variation de ce paramètre sont énormes (de 0 à 10) ce qui rejoint les observations faites sur les corrélations.

Le LAI-2000 PCA corrigé suit la même tendance que pour la photographie hémisphérique. Ceci s'explique très bien par le fait que le facteur de clumping est issu du traitement des

photos hémisphériques, donc si cette dernière méthode n'est pas adaptée, le facteur de clumping obtenu ne permettra pas une bonne correction du LAI-2000 PCA.

Enfin, cette représentation semble confirmer l'hypothèse sur la pertinence de la définition du LAI : Le LAI Standard semble plus adapté pour estimer le LAI du palmier. En effet, dans le cas du LAI Standard, le nuage de point se répartit tout le long de l'axe alors qu'on observe un regroupement dans le cas du graphe du LAI1. Cette deuxième représentation semble confirmer que la définition du LAI standard est plus adaptée aux mesures de LAI de l'arbre.

Le LAI mesuré avec le LAI-2000 PCA non corrigé du facteur de clumping est l'estimation la plus proche de la méthode destructive. Nous nous servons uniquement de cette méthode pour établir le modèle LAI / NDVI.

L'idéal serait de calculer un facteur correctif entre le LAI obtenus par LAI-2000 PCA et le LAI destructif, de manière à établir un modèle entre LAI et NDVI avec des valeurs une meilleure estimation de LAI.

I.3 Création du modèle de corrélation LAI / NDVI

La population de couples (NDVI, LAI) est analysée sous le logiciel de statistiques R, pour les blocs d'une part et les palmiers individuels d'autre part. Nous avons testé les corrélations de type exponentiel et linéaire, qui sont généralement constatées dans la littérature. Dans les deux cas, aucun modèle exponentiel ne converge. En revanche, une relation linéaire est établie entre ces deux variables.

❖ A l'échelle du bloc

La population étudiée comporte 21 blocs qui ont été mesurés par la méthode des transects et ne se trouve pas sous un nuage ou une ombre de nuage. Ce nombre est malheureusement un peu faible pour extraire un échantillon d'apprentissage et un échantillon de validation : il faudrait donc opérer par validation croisée, si possible sur plus de données, de manière à s'assurer que le modèle est stable. Dans un premier temps, afin de tester la faisabilité de ce type de corrélation, nous avons lancé les recherches sur l'ensemble de cette population (cf. Figure 27). La relation obtenue est la suivante :

$$\text{LAI} = 25,16 * \text{NDVI} - 11,66$$

L'erreur de prédiction de ce modèle est de 0,5. Le coefficient de corrélation entre le LAI mesuré et le LAI estimé par cette relation est relativement bon (0,76) mais avec un coefficient de détermination un peu faible (0,57) (cf. Tableau 5). C'est donc un modèle assez bon, qu'il faudrait cependant valider sur un jeu de données plus grand.

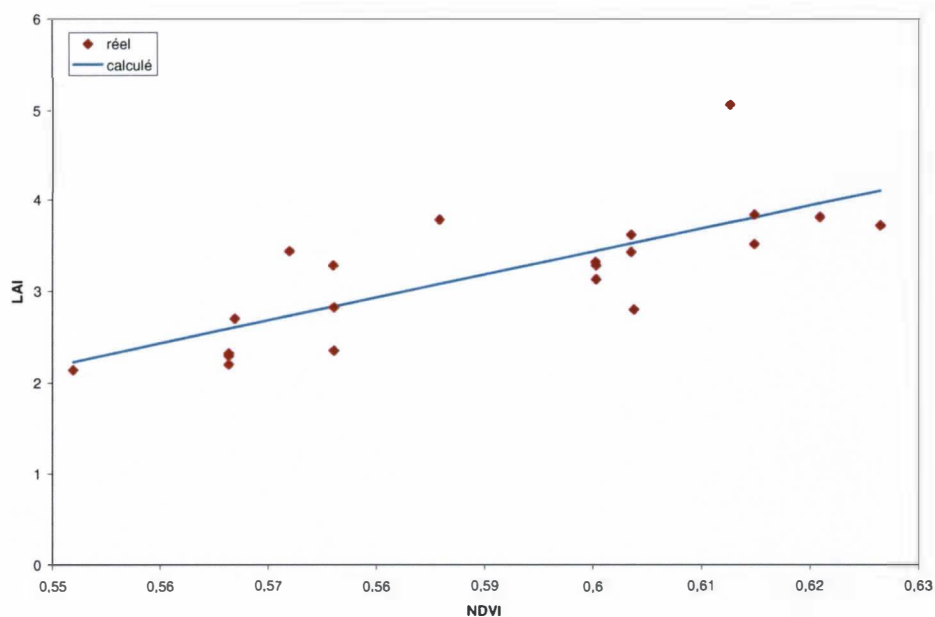


FIGURE 27 : RELATION ENTRE NDVI EXTRAIT DE L'IMAGE ET LAI MESURE SUR LE TERRAIN

Coefficient de détermination	0,57
Coefficient de corrélation	0,76
Erreur quadratique moyenne	0,5

TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA RELATION LINEAIRE OBTENUE ENTRE LAI ET NDVI A L'ECHELLE DU BLOC DE PALMIERS

❖ A l'échelle du palmier

60 palmiers ont pu être identifiés sur l'image, ayant fait l'objet de mesures de LAI individuel. La recherche de corrélation entre LAI et NDVI a été faite par validation croisée, c'est-à-dire que des échantillons de 40 palmiers pour l'apprentissage et 20 palmiers pour la validation ont été tirés aléatoirement dans la population totale, avec 22 tirages différents. 22 modèles linéaires sont ainsi été établis, présentant une apparente stabilité dans les deux coefficients de la régression ainsi que dans l'erreur de prédiction. Cette stabilité est caractérisée en particulier par des écarts moyens très faible de ces trois paramètres : 2,1 pour le coefficient directeur, 1,3 pour l'ordonnée à l'origine et 0,5 pour l'erreur de prédiction.

La relation linéaire moyenne obtenue est alors la suivante : $LAI = 21,6 * NDVI - 9,3$.

Par ailleurs, à titre de comparaison, nous avons recherché un modèle linéaire basé sur l'ensemble de la population (les 60 individus) : $LAI = 22,2 * NDVI - 9,7$, avec une erreur de prédiction de 0,9. Il apparaît donc que les coefficients de la régression sont quasiment égaux à la moyenne des coefficients des 22 tests, de même que l'erreur de prédiction.

Il en résulte que nous avons obtenu un modèle d'estimation du LAI du palmier individuel à partir de son NDVI moyen particulièrement stable, mais ayant une forte erreur de prédiction (0,9) et de faibles coefficients de corrélation (0,58) et de détermination (0,34) (cf. Tableau 6).

Coefficient de détermination	0,34
Coefficient de corrélation	0,58
Erreur quadratique moyenne	0,9

TABLEAU 6 : CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA RELATION LINEAIRE OBTENUE ENTRE LAI ET NDVI A L'ECHELLE DU PALMIER INDIVIDUEL

Cette forte dispersion et cette erreur assez importante peuvent venir de l'extraction de la radiométrie du palmier en raison des contraintes de digitalisation de l'arbre sur l'image, relativement subjective et basée sur un modèle de disque identique pour chaque arbre. Cette technique n'est peut être pas assez précise et on prend probablement parfois en compte des pixels qui en réalité n'appartiennent pas au palmier.

I.4 Cartographie du LAI

Les cartes de LAI ont été obtenues en appliquant chacun des deux modèles calculés ci-dessus respectivement à un bloc entier ou à un palmier individuel. Même si ces relations ne sont pas optimums, l'objectif est de montrer l'utilité de telles expérimentations. Ces cartes constituent un outil pour l'aide à la gestion agronomique.

❖ Echelle du bloc de palmier

La carte que nous obtenons (cf. Figure 28) présente les blocs de palmiers, n'étant pas ou peu recouvert par un nuage ou son ombre, affectés d'une couleur représentant le LAI moyen du bloc. Cette carte permet de visualiser s'il y a des différences importantes au sein même de la plantation et de comparer deux plantations différentes pour évaluer, par exemple, l'impact de la variation de paramètres tels que la densité de plantation. Elle peut aussi être mise en relation, par exemple, avec des rendements au bloc ou encore avec des cartes de sol.

LAI moyen par bloc - Juin 2008 Plantation de Padang Halaban Nord Sumatra, Indonésie

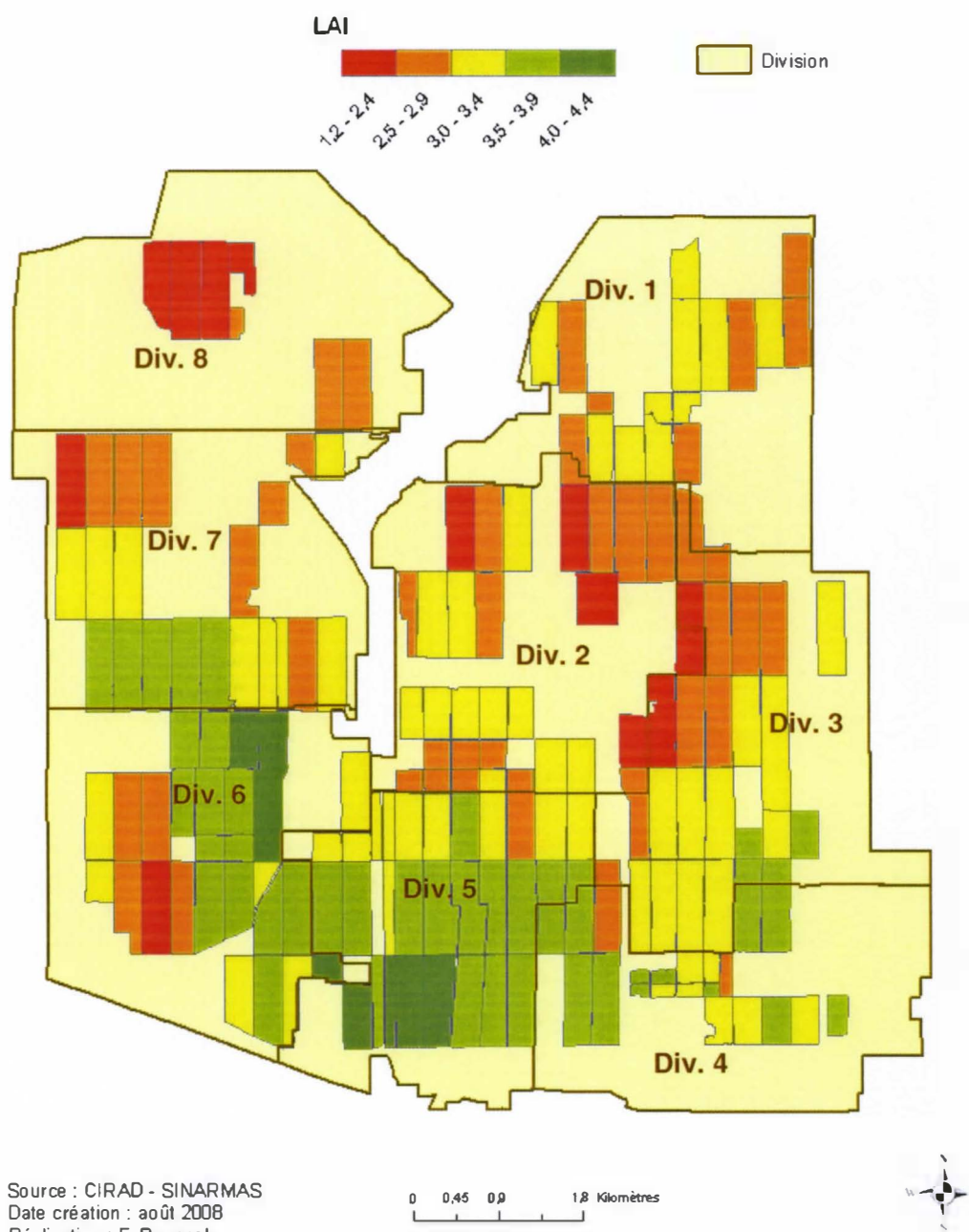


FIGURE 28 : REPARTITION DES LAI MOYENS PAR BLOC AU SEIN DE LA PLANTATION

Les valeurs de LAI sont donc relatives et sont sous-évaluées du fait que nous n'avons pas corrigé les mesures du LAI-2000 PCA par le facteur de clumping. Cependant, le modèle peut s'appliquer à tous types de plantation de palmiers. On pourra par exemple comparer la carte de deux plantations différentes.

On remarque que les LAI les plus forts, représentant donc un bon développement foliaire des arbres, sont regroupés au Sud de la plantation. Une telle répartition peut s'expliquer par une contrainte extérieure telle qu'un type de sol meilleur, ou une topographie plus favorable. Pour confirmer et développer une explication agronomique, des informations supplémentaires sont indispensables, qui pourront être couplées à cette carte au sein d'un SIG.

Tous les blocs de la plantation n'ont pu être étudiés du fait de la présence de nuages qui voilent la radiométrie du sol. Cela constitue une des limites de notre étude, basée sur des images optiques liées aux conditions climatiques.

❖ Echelle du palmier

Nous avons tout d'abord établi la cartographie du LAI au sein d'un bloc de palmiers à partir de la relation obtenue pour le palmier individuel, à l'échelle de l'entité palmier numérisée sous forme de disque (cf. Figure 29 A). Ensuite, nous avons directement appliqué cette relation à chaque pixel du bloc, même si normalement le modèle ne s'y applique pas directement (cf. Figure 29 B). Enfin, la relation a également été appliquée à chaque pixel du bloc, mais à partir d'une image rééchantillonnée à 9 mètres de résolution (taille moyenne du palmier) suivant la méthode des plus proches voisins, de manière à ce qu'un pixel représente théoriquement un palmier (cf. Figure 29 C). Cette carte devrait donc théoriquement être comparable à la première ; même s'il est peu probable qu'un pixel se superpose exactement à un palmier donné.

LAI moyen au sein d'un bloc Plantation de Padang Halaban juin 2008 Sumatra, Indonésie

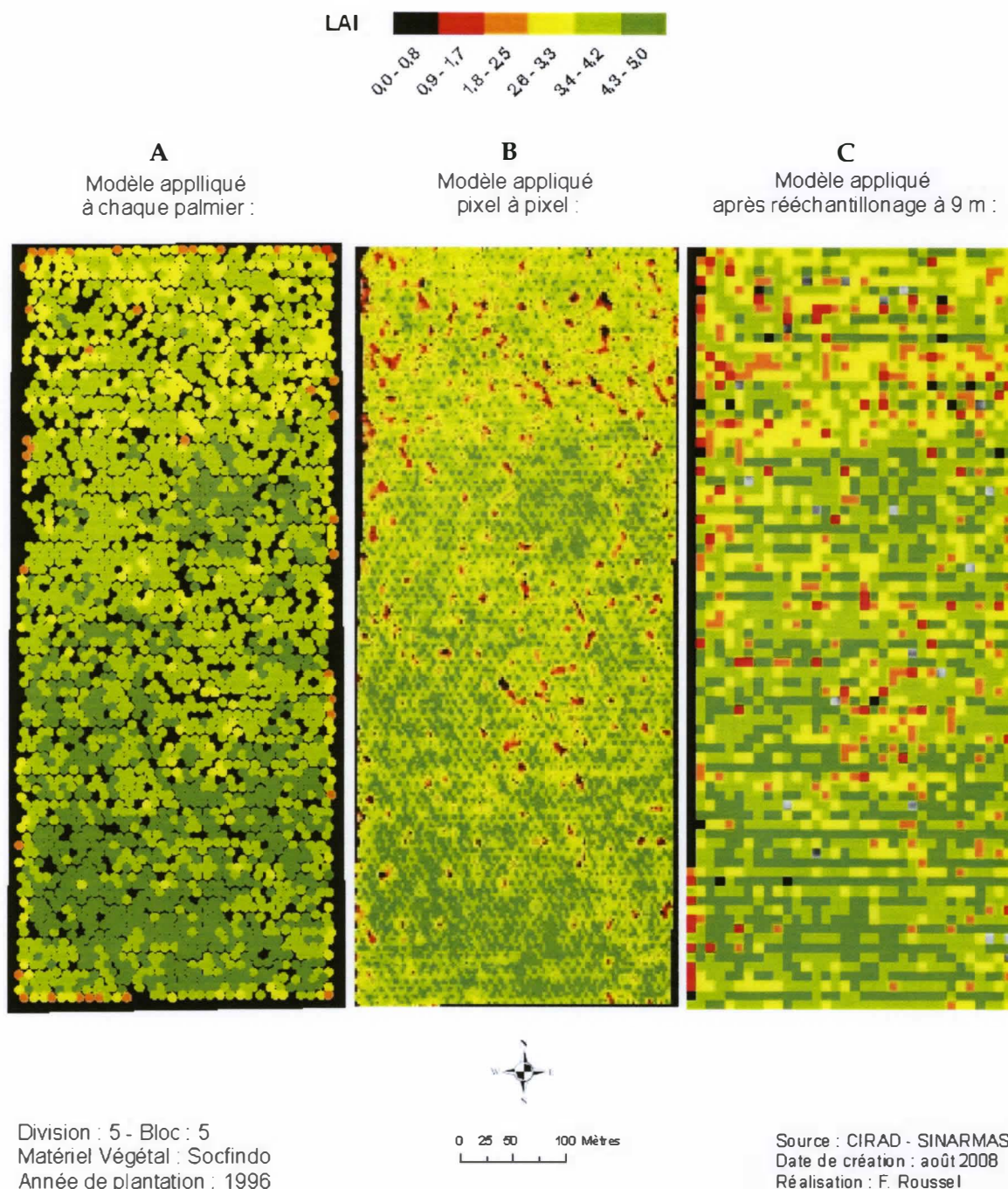
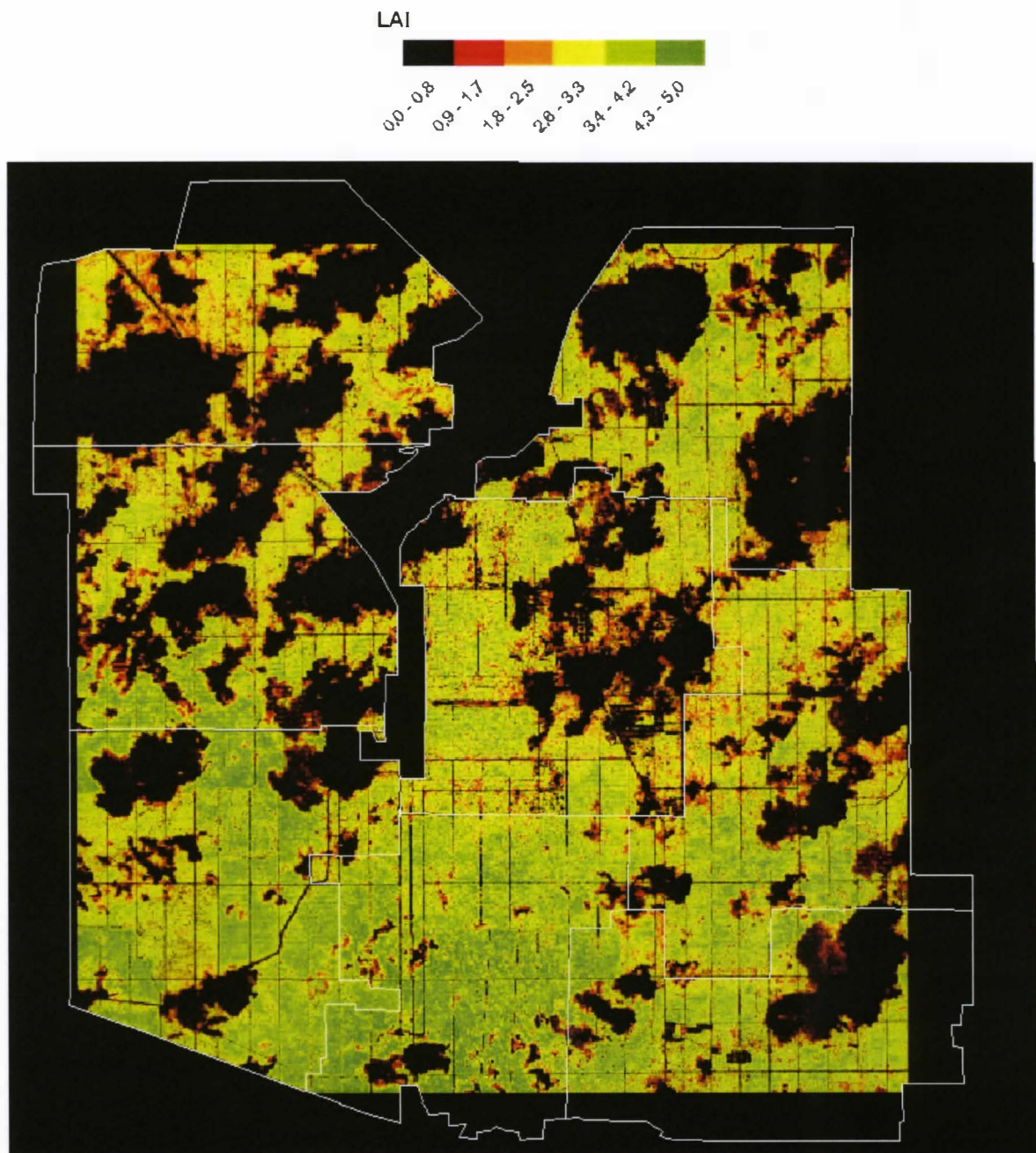


FIGURE 29 : COMPARAISON DE TROIS TYPES DE REPRESENTATION D'UNE CARTE DE LAI D'UN MEME BLOC DE PALMIERS

Les trois cartes semblent concorder au niveau de la répartition des zones de forts et faibles LAI. Sur le modèle pixel à pixel, on observe plus de zones à faible LAI (rouge) qui sont en réalité des trouées ou des éléments 'non-palmiers'. Ces zones-là ne sont pas présentes sur la carte de gauche car seule la radiométrie des palmiers représentés par des cercles est prise en compte. Enfin, la carte produite à partir d'un ré-échantillonnage met en évidence les mêmes tendances que les deux autres, tout en atténuant l'effet des trouées rencontrées sur la carte pixel à pixel.

Le modèle semble donc assez stable pour être appliqué sur une image pixel à pixel ce qui facilite les traitements : nul besoin de digitaliser tous les palmiers manuellement. Il en résulte qu'il est possible d'appliquer la relation entre le LAI et le NDVI à tous les pixels de toute l'image Quickbird de manière à obtenir la cartographie du LAI de l'ensemble de la plantation à l'échelle du palmier (cf. Figure 30). Ce type de représentation permet de localiser rapidement les variations de LAI et les hétérogénéités locales, afin de cibler le bilan agronomique sur des zones à faible LAI.

LAI par pixel de la plantation de Padang Halaban Sumatra, Indonésie - juin 2008



Source : CIRAD- SINARMAS
Date de création : août 2008
Réalisation : F. Roussel



0 0,5 1 2 Kilomètres

**FIGURE 30 : CARTOGRAPHIE DU LAI A L'ECHELLE DU PALMIER SUR LA PLANTATION DE
PADANG HALABAN, NORD-SUMATRA**

II Discussion

II.1 Méthode d'estimation du LAI

❖ A l'échelle du bloc de palmiers

Nous avons choisi de tester deux méthodes indirectes d'estimation du LAI :

- la photographie hémisphérique, qui paraît très prometteuse d'après les expérimentations relatées dans la littérature mais sur d'autres types de matériel végétal que le palmier ;
- le LAI-2000 PCA LI-COR, qui a prouvé sa robustesse dans de nombreuses études et notamment sur le palmier, son principal défaut étant de ne pas tenir compte des effets d'agrégation des feuilles (facteur de clumping).

D'après les valeurs de LAI obtenues, il semble que la photographie hémisphérique n'estime pas le LAI aussi bien que le LAI-2000 PCA, ni le facteur de clumping. De ce fait, les valeurs de LAI dérivées du LAI-2000 PCA et corrigées par ce facteur de clumping sont moins corrélées à nos valeurs destructives.

Ce biais peut avoir plusieurs origines :

- la qualité de prise des clichés : quand les photographies ne sont pas prises avec un appareil bien horizontal, le centre de l'image ne correspond pas tout à fait à l'angle azimutal de 0°. De plus, quand les conditions d'éclairement sont très différentes d'une image à l'autre, traiter 12 photos à la fois peut engendrer des petites erreurs de classification qui se répercutent sur l'ensemble de la classification.
- la compilation des dossiers de résultats. En effet nous avons environ 80 photos par transect, traitées par groupe de 12 photos, ce qui fait au final 7 groupes de 12 photos environ qu'il faut compiler pour avoir un résultat. Or l'application qui compile ces groupes de photos ne peut travailler à l'heure actuelle qu'avec 4 groupes de photos, ce qui nous fait 48 photographies pour un bloc. De ce fait on perd la moitié de l'information mesurée sur le bloc. Il semble que ce soit l'origine principale de l'erreur obtenue avec cette technique.

Enfin, la technique de la photo hémisphérique n'est pas envisageable pour les mesures de blocs de palmiers du fait du temps nécessaire aux traitements. En effet, le nombre de photo étant très important, les traitements prennent énormément de temps et ne sont pas exploitables en l'état pour développer un outil pratique voire opérationnel, utilisable en plantation.

❖ A l'échelle du palmier

Les mêmes observations sont faites à l'échelle du palmier pour la photographie hémisphérique. Cette technique n'est pas adaptée pour mesurer un seul arbre. Notre idée a été de prendre un très grand nombre de photographies autour du stipe de l'arbre (24) pour être sûr de prendre en compte toutes les facettes de la canopée. Toutes les photographies ont été traitées, donc de nombreuses zones de la canopée se sont recoupées. Il serait intéressant de tester en prenant un nombre de photographie moins importante et de recombinaison une sorte de photo hémisphérique acquise au centre du stipe, pour comparer la précision des deux méthodes.

II.2 Les modèles de prédiction du LAI

En l'état, les deux modèles ne sont pas totalement aboutis car nous n'avons pas pu corriger le biais entre mesures indirectes et destructives, ce qui provoque une sous-estimation systématique des valeurs quantitatives. Ceci s'explique notamment par le manque de mesures dans le cas des blocs, auxquelles il faudrait ajouter de nouvelles mesures de transects. Dans notre cas, ayant reçu l'image Quickbird après la mission en Indonésie, nous avons mesuré des blocs qui se sont avérés cachés par des nuages sur l'image, réduisant ainsi notre base de données de 52 blocs mesurés à 21 blocs exploitables. De plus, ce modèle reste à valider, mais dans ce cas également il nous faudrait plus de mesures.

Le modèle obtenu sur les arbres individuels ne permet d'estimer le LAI qu'avec une erreur de 0,9, ce qui est relativement élevé. Il faudrait s'assurer qu'elle est acceptable dans un modèle de type écophysiologique, ce qui est peu probable. Le nombre de mesures est statistiquement suffisant, mais la construction du modèle est basée sur des valeurs qui sont non corrigées par le facteur de clumping. Ceci a pu affecter quelque peu la qualité du résultat. L'idéal serait de tester un nouveau modèle avec des valeurs de LAI mesurées et corrigées, cependant la grosse difficulté reste d'obtenir ce facteur de clumping.

Nous pouvons donc émettre deux hypothèses pour expliquer ces résultats :

- Soit le NDVI n'est pas le meilleur indice de végétation adapté pour estimer le LAI dans le cas du palmier : dans la continuité de cette étude, d'autres indices (ex. SAVI, EVI...) doivent être testés pour évaluer le gain en précision du modèle.
- Soit mesurer le LAI n'est pas pertinent à l'échelle d'un arbre. Ce paramètre est généralement utilisé pour un groupe d'individus, mais pas à l'échelle d'une seule entité. Un autre paramètre que le LAI (ex. la biomasse) pourrait être testé pour mettre en évidence l'état physiologique du palmier.

II.3 Cartographie du LAI

L'existence d'un modèle d'estimation, même limité par son niveau d'erreur et les différents biais constatés, permet de cartographier le LAI à l'échelle du palmier aussi bien qu'à celle du bloc de palmiers dans son ensemble.

La cartographie des blocs permet d'avoir un aperçu global des zones en sous-développement de la plantation. Elle peut être mise en relation avec les pratiques culturales, la qualité du milieu (sol, drainage...) ou encore les rendements.

La cartographie à l'échelle du palmier présente une bonne stabilité quelle que soit sa méthode de production : sur la base des vecteurs «circulaires » digitalisés à la main, pixel à pixel sur l'image à très haute résolution et pixel à pixel sur l'image rééchantillonnée à 9m. La carte des palmiers digitalisés à la main est en principe la plus robuste car fidèle au principe d'extraction de la radiométrie du palmier qui a servi à développer le modèle, mais elle n'est pas viable en tant qu'outil opérationnel car la digitalisation des palmiers est extrêmement longue et fastidieuse. Elle contient aussi une source d'erreurs possible compte tenu de l'interprétation de la position du palmier. Cependant, l'application du modèle sur l'image pixel à pixel et sur l'image rééchantillonnée à 9m donne des représentations tout à fait comparables à cette référence, tant du point de vue spatial que quantitatif. Par ailleurs, elles discriminent très bien les zones à fort et faible LAI. L'avantage d'appliquer le modèle sur

l'image pixel à pixel est que cette opération est très rapide à mettre en œuvre. Quant à la carte du LAI après rééchantillonnage à 9m, l'avantage est que la taille de pixel correspond à l'emprise de l'arbre et donc la radiométrie est plus proche de celle utilisée pour construire le modèle, mais il n'est pas exact que ledit pixel soit effectivement centré sur l'arbre, ce qui peut engendrer des biais. La bonne stabilité de l'information obtenue avec les trois méthodes permet de proposer l'application directe de la relation sur le pixel à 2,5m sans générer d'erreur importante.

Conclusion

Cette étude s'insère dans un projet de recherche visant à développer des outils d'estimation de paramètres biophysiques par télédétection, en vue d'améliorer et raisonner la gestion de la plantation. Les objectifs étaient de mettre en place une méthode d'estimation de l'indice foliaire (LAI), témoin du statut agronomique du palmier, à l'échelle d'un bloc de palmiers aussi bien que de l'arbre individuel.

Nous avons donc en premier lieu élaboré une base de données de terrain, mesurées dans une palmeraie de Nord-Sumatra (Indonésie), comprenant 4 types différents de matériel végétal et 20 années de plantation. Trois techniques de mesure ont été utilisées: destructive, photographie hémisphérique et LAI PCA Plant Canopy Analyzer (PCA). En effet, bien qu'offrant la meilleure estimation du LAI, la méthode destructive ne pouvait suffire à elle-seule pour constituer notre base de données sur suffisamment de cas, car cette technique est trop longue à mettre en œuvre. Nous nous sommes donc naturellement tournés vers des méthodes indirectes plus rapides afin de mesurer un maximum de variabilité. Nous avons ainsi mesuré le LAI de 52 blocs de palmiers et 432 arbres individuels, dont 28 par la technique destructive. Un protocole a été mis en place pour chacune des techniques utilisées. Les palmiers ont été localisés à l'aide de points GPS et de leur numéro d'immatriculation identifié sur le terrain, lequel était rarement inscrit sur le palmier lui-même. Compte tenu des précisions GPS (de l'ordre de 5 à 10m) et de la difficulté à s'orienter dans une plantation donc à compter correctement l'identifiant des palmiers, ce procédé comporte une source d'erreur possible sur la localisation ultérieure d'un arbre dans l'image satellite. Il faut donc garder à l'esprit qu'un élément perturbateur des modèles que nous cherchons à définir peut avoir été à la base mal identifié sur le terrain. Par ailleurs, il serait intéressant de pouvoir améliorer ce procédé d'identification pour les futures études de ce type.

Nous avons ensuite comparé les deux techniques indirectes d'estimation du LAI en prenant comme valeur de référence le LAI destructif. Il apparaît que la technique des photographies hémisphériques est la moins stable, ce qui fausse également la valeur du facteur d'agrégation des feuilles (clumping) que nous souhaitons utiliser pour corriger les valeurs estimées au moyen du LAI-2000 PCA. Par conséquent, nous avons uniquement travaillé avec les valeurs du LAI-2000 PCA non corrigé par le facteur clumping. Il n'a pas non plus été possible d'estimer un facteur correctif simple entre ces valeurs, qui sous-estiment le LAI, et celles mesurées par la méthode destructive. Cela nous empêche donc à l'heure actuelle de proposer des valeurs quantitatives absolues dans nos produits. L'une des premières suites à donner à cette étude serait de remédier à cette limite.

Enfin, l'image Quickbird a été traitée de manière à pouvoir extraire la radiométrie d'un individu palmier d'une part, et d'un bloc de palmiers d'autre part. Ces traitements ont consisté en une orthorectification et une calibration instrumentale, suivies d'un repérage précis des objets étudiés et, enfin, à la construction de couches vectorielles appropriées aux deux échelles de travail. Les relations entre le LAI mesuré in situ et le Normalized Vegetation Index (NDVI) extrait de l'image ont alors été analysées. Il est apparu que ces deux variables sont linéairement corrélées, à l'échelle du bloc comme à celle du palmier. La première relation, applicable à un bloc de palmier, permet d'estimer le LAI avec une erreur absolue de 0,5 (corrélation=0,76 et $r^2=0,57$). Cette relation doit cependant être validée au moyen d'un plus grand nombre de mesures de terrain.

Celle établie pour les palmiers individuels, obtenue par validation croisée et présentant une bonne stabilité, est pourtant beaucoup moins robuste et donne une erreur absolue assez forte: 0,9. En outre, les valeurs estimées à cette échelle sont très dispersées

(corrélation=0,58 et $r^2 = 0,34$). Il faudrait donc analyser les relations possibles entre le LAI et d'autres indices de végétation, tels que le SAVI ou l'EVI, lesquels permettent de s'affranchir de certaines conditions du milieu qui pourraient interférer ici avec notre objet « palmier » (sol, atmosphère...). Cela permettrait peut-être d'aboutir à une meilleure cohérence des estimations et des erreurs moins fortes.

Toutefois, il est à présent essentiel de pouvoir ramener ces valeurs de LAI, sous-estimées en raison du principe de la mesure au LAI-2000 PCA, à des valeurs absolues (proches des mesures destructives), afin de proposer un produit quantitatif fiable. L'erreur commise en relatif pour des LAI de l'ordre de 3 à 6 est donc en moyenne de 9% sur les blocs et de 15% sur les palmiers individuels. Ces erreurs sont à présent à confronter avec le besoin en précision d'estimation du LAI par les agronomes sur le terrain d'une part, et les écophysiologistes dans leurs modèles d'autre part.

Dans les deux cas, il semble aussi intéressant de réitérer l'approche en séparant les différentes provenances (matériel végétal) des palmiers, de manière à s'affranchir d'un éventuel « effet variétal » capable de perturber la stabilité ou la pertinence des modèles de corrélation entre indices de végétation et LAI.

Nous avons ainsi pu cartographier le LAI à plusieurs échelles spatiales.

- La cartographie du LAI moyen d'un bloc de palmier sur toute la plantation est un produit rapide à obtenir au moyen de techniques de SIG à partir du moment où les parcelles sont digitalisées. Elle permet d'analyser la variabilité inter-blocs et de la mettre en relation avec, d'une part, les densités de plantation pour gérer les problèmes de concurrence entre palmiers et d'élagage des arbres et, d'autre part, les rendements au bloc afin d'évaluer la pertinence de ces densités de plantation. Elle offre aussi un support cartographique quantitatif prêt à être intégré dans un SIG, permettant après croisement avec d'autres caractéristiques du bloc (densité de plantation et âge de plantation en particulier) de diagnostiquer l'état agronomique global du bloc.

- A l'échelle du palmier, nous avons montré que la relation obtenue à partir de la digitalisation des palmiers individuels, étape absolument pas opérationnelle, peut aussi s'appliquer directement pixel à pixel après un ré-échantillonnage de l'image à 9m de résolution. Il serait, techniquement parlant, intéressant de vérifier que cette méthodologie pourrait s'appliquer à des images de type SPOT5 (5 mètres de résolution spatiale en « supermode ») qui sont moins coûteuses dans le contexte des grosses plantations industrielles, une fois que cette relation a été mise en place grâce aux outils à très haute résolution spatiale. D'un point de vue agronomique, cette carte du LAI à l'échelle du palmier répond tout à fait aux objectifs de raisonnement de la conduite agricole, puisqu'elle permet d'identifier des zones critiques, à sous-potentiel, à l'intérieur même des parcelles.

Outre les différentes solutions d'amélioration proposées afin d'assurer la fiabilité des valeurs quantitatives affichées, cette étude permet donc d'affirmer le fort potentiel de l'imagerie satellite à très haute résolution spatiale pour cartographier et estimer de manière quantitative le LAI du palmier à huile en plantation. Les produits obtenus sont faciles à mettre en œuvre et offrent de nombreuses perspectives de diagnostic en couplage avec d'autres données au sein d'un SIG.

BIBLIOGRAPHIE

- Adrian, A.M.; Norwood, S.H.; Mask, P.L., 2005: Producer's perceptions and attitudes towards precision agriculture technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48, 256-271.
- Azleen N., Washid BO., Tarmizi AM., Basri W., 2003: Remote sensing for oil palm foliar nitrogen, Malaysian Palm Oil board, Ministry of Primary Industries, Malaysia.
- Baret F. et Guyot G., 1991: Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment 1991, *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.
- Chew J.S., Anuar A.R., 2000: Practical mapping of oil palm yield using GPS and GIS Technologies, International Planters Conference.
- Cihlar, J.; St-Laurent, L.; Dyer, J., 1991: Relation between the normalized vegetation index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, 35, 279-298.
- Colombo R., Bellingeri D. Fasolini D., Marino C., 2003: Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 86, 120-131.
- Coyea, M.R., Margolis, H.A., 1994: The historical reconstruction of growth efficiency and its relationship to tree mortality in balsam fir ecosystems affected by spruce budworm, *Canadian Journal Of Forest Research*, 24 (11), 2208-2221
- Demarez V., Duthoit S., Baret F., Weiss M., Dedieu G., 2008: Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs, *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (4), 644-655
- Gitelson, A.A.; Kaufman, Y.J.; Merzlyak, M.N. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 1996, 58, 289-298.
- Granier, A; Biron, P; Lemoine, D, 2000: Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands, *Agricultural And Forest Meteorology*, 100 (4), 291-308.
- Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 1988, 25, 295-309.
- Hurley, T.M.; Oishi, K.; Malzer, G.L. Estimating the potential value of variable rate nitrogen applications: a comparison of spatial econometric and geostatistical models. *Journal of Agricultural Resource Economics* 2005, 30, 231-249.
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F., 2004: Review of methods for in situ leaf area index determination - Part 1: Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19-35.
- Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., 2005: Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography, *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 96-114.
- Jongschaap, E. E, 2007: Sensitivity of a crop growth simulation model to variation in LAI and canopy nitrogen used for run-time calibration, *Ecological Modelling*, 200 (1/2), 89-98.
- Jonhson L.F., Roczen D.E., Youkhana S.K., Nemani R.R., Bosch D.F., 2002: Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery, *Computers and Electronics in Agriculture*, 38, 33-44.
- Julia, C., 2007: Modélisation et simulation de l'architecture du palmier à huile afin de calculer l'interception lumineuse par le couvert végétal, mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'ENITA de Clermont-Ferrand, 40 pages.

Kovacs J.M., Flores-Verdugo F., Wang J. Aspden L.P., 2004: Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data, *Aquatic Botany*, 80, 13-22.

Lelong C., Lanore M. et Caliman J-P., 2006: "Evaluation of Hyperspectral Remote Sensing Relevance to Estimate Oil Palm Trees Nutrition Status", *Proceedings of the Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Conference*. Ed. José A. Sobrino. Servicio de Publicaciones. Universitat deValencia. Valencia, p147-155.

Lelong C., Burger P., Jubelin G., Roux B., Labbé S., Baret F, 2008: Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots, *Sensors*, 8, 3557-3585; DOI: 10.3390/s8053557.

Machado, J.L.; Reich, P.B., 1999: Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory, *Canadian Journal Of Forest Research*, 29 (9), 1438-1444.

McMorrow J., 1995: Relation of oil palm spectral response to stand age, *International Journal of Remote Sensing*, 16 (16) 3203-3209.

McMorrow J., et Seng-Heng T., 2000: The potential of Landsat TM Remote Sensing Images for Oil Palm Estate Management. *International Planters Conference*, May 2000.

Murakami, E.; Saraiva, A.M.; Ribeiro, L.C.M.; Cugnasca, C.E.; Hirakawa, A.R.; Correa, P.L.P., 2007: An infrastructure for the development of distributed service-oriented information system for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58, 37-48.

Naert B., Gal R., Lubis A.U., Suwandi, Olivin J. , 1990 : Première évaluation des possibilités d'exploitation de la télédétection spatiale pour l'étude du fonctionnement d'une plantation de palmiers à huile à Nord-Sumatra, *Oléagineux*, Vol.45, n°5 –b, Mai 1990.

Nemenyi, M.; Milics, G. .2007: Precision agriculture technology and diversity. *Cereal Research Communications*, 35, 829-832.

Righi, C.A et Bernardes, M. S. 2008: The potential for increasing rubber production by matching tapping intensity to leaf area index, *Agroforestry Systems*, 72 (1), p1-13.

Rondeaux, G.; Steven, M.; Baret, 1996: F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 95-107.

Sprinstin M., Karnieli A., Berliner P., Rotenberg E., Yakir D. Cohen S. The effect of spatial resolution on the accuracy of leaf area index estimation for a forest planted in the desert transition zone 2006, *Remote sensing of environment* 109 (2007) 416-428.

Stenberg, B.; Jonsson, A.; Borjesson, T. , 2005: Use of near infrared reflectance spectroscopy to predict nitrogen uptake by winter wheat within fields with high variability in organic matter. *Plant and Soil*, 269, 251-258.

Tailliez, B., Koffi, C. B., 1992: A method for measuring oil palm leaf-area, *Oléagineux*, 47 (8-9), 540-542.

Tey S.H., Goh K.J., Chew P.S., 2000: Digital Elevation Model for Site Specific Management in plantation crops, *International Planters Conference*.

Vargas, L.A.; Andersen, M.N.; Jensen, C.R, et al., 2002: Estimation of leaf area index, light interception and biomass accumulation of *Miscanthus sinensis* 'Goliath' from radiation measurements, *Biomass & Bioenergy*, 22 (1), 1-14.

Vose, J.M., Allen, H.L., 1988: Leaf-area, stemwood growth, and nutrition relationships in loblolly-pine, *Forest Science*, 34 (3), 547-563.

Watson, D.J., 1947: Comparative physiological studies on the growth of field crops. Variations in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annales of Botany*. 11, 41-76.

Table des matières

0

Résumé.....	1
Abstract.....	2
Remerciements.....	3
Sommaire.....	4

INTRODUCTION **5**

PARTIE 1. CONTEXTE DU STAGE **6**

I	CONTEXTE GENERAL	6
	I.1 LA STRUCTURE D'ACCUEIL	6
	I.2 LE PROJET	6
	I.3 LE SITE D'ETUDE	7
II	CONTEXTE AGRONOMIQUE ET GEOMATIQUE	8
	II.1 LE PALMIER DANS LE MONDE	8
	II.2 MORPHOLOGIE DU PALMIER À HUILE	9
	II.3 PRATIQUES CULTURALES ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL	10
	II.4 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA PRÉSENTE ÉTUDE	12

PARTIE 2. DÉFINITIONS ET ACQUISITION DES DONNÉES **14**

I	ÉTAT DE L'ART	14
	I.1 LES PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES MESURÉS EN TÉLÉDÉTECTION	14
	I.2 INTÉRÊT DE LA TRÈS HAUTE RÉOLUTION	15
	I.3 CHOIX DES INDICES DE VÉGÉTATION	15
	I.4 LES TECHNIQUES D'ESTIMATION DU LAI	15
II	DÉFINITION DU LEAF AREA INDEX (LAI) ET PLANT AREA INDEX (PAI)	17
	II.1 MÉTHODES DIRECTES	17
	II.2 MÉTHODES INDIRECTES	18
III	ÉTABLISSEMENT DES PROTOCOLES	24
	III.1 MÉTHODE DIRECTE OU DESTRUCTIVE	24
	III.2 MÉTHODES INDIRECTES	29

PARTIE 3. TRAITEMENTS **33**

I	TRAITEMENT DES MESURES PRISES AU LAI-2000 PCA LI-COR	33
----------	---	-----------

II	TRAITEMENTS DES PHOTOS HEMISPHERIQUES	33
III	TRAITEMENTS DE L'IMAGE QUICKBIRD	36
	III.1 CORRECTIONS ET PRÉ-TRAITEMENTS	36
	<i>III.1.1 CORRECTIONS INSTRUMENTALES</i>	<i>36</i>
	<i>III.1.2 ORTHORECTIFICATION</i>	<i>36</i>
	III.2 CALCUL DU NDVI	38
	<i>III.2.1 EXTRACTION DE LA RADIOMÉTRIE AU NIVEAU DU BLOC</i>	<i>38</i>
	<i>III.2.2 EXTRACTION DE LA RADIOMÉTRIE AU NIVEAU DU PALMIER</i>	<i>39</i>
	<i>III.2.3 CALCUL DU NDVI</i>	<i>40</i>
	<u>PARTIE 4. RESULTATS, INTERPRETATION ET DISCUSSION</u>	<u>41</u>
I	RESULTATS ET INTERPRETATION	41
	I.1 COMPARAISON DE DEUX DÉFINITIONS DU LAI SUR UN ARBRE INDIVIDUEL	41
	I.2 COMPARAISON DES TROIS MÉTHODES DE CALCUL SUR LES ARBRES INDIVIDUELS	42
	I.3 CRÉATION DU MODÈLE DE CORRÉLATION LAI / NDVI	44
	I.4 CARTOGRAPHIE DU LAI	46
II	DISCUSSION	52
	II.1 MÉTHODE D'ESTIMATION DU LAI	52
	II.2 LES MODÈLES DE PRÉDICTION DU LAI	53
	II.3 CARTOGRAPHIE DU LAI	53
	<u>CONCLUSION</u>	<u>55</u>
	<u>Bibliographie</u>	<u>57</u>
	<u>Table des matières</u>	<u>60</u>
	<u>Liste des figures</u>	<u>62</u>
	<u>Liste des tableaux</u>	<u>63</u>
	<u>Liste des annexes</u>	<u>63</u>

Liste des figures

FIGURE 1 : CARTE DE LOCALISATION DE LA PLANTATION DE PADANG HALABAN	7
FIGURE 2 : DISTRIBUTION DU PALMIER A HUILE EN ASIE DU SUD EST EN 2003 (T. FAIRHURST & HARDTER)	8
FIGURE 4 : DESCRIPTION D'UNE FEUILLE DE PALMIER A HUILE, OU PALME.	9
FIGURE 5 : COLLECTE DE REGIMES (PHOTO DE GAUCHE) ET DE DRUPES (PHOTO DE DROITE)	10
FIGURE 6 : DESCRIPTION DE LA DRUPE DU PALMIER.....	10
FIGURE 7 : PALMIERS JUVENILES EN PEPINIERE.....	11
FIGURE 8 : PLANTATION DE JEUNES PALMIERS VUE DE DESSUS.....	11
FIGURE 9 : COMPOSANTS DU LAI PCA DE LI-COR (HTTP://WWW.LICOR.COM/ENV/PRODUCTS/AREAMETERS/LAI_PCA/2000_INTRO.JS) .	18
FIGURE 10 : REPRESENTATION DES ANNEAUX DE MESURE DE LA LENTILLE DU LAI-2000 PCA	19
FIGURE 11 : MESURE DES MENSURATIONS DE L'ARBRE	25
FIGURE 12 : IDENTIFICATION DU NUMERO DES FOLIOLES SUR LE RACHIS	26
FIGURE 13 : DECOUPE DES FOLIOLES (1 FOLIOLE SUR 6)	26
FIGURE 14 : MESURES CARACTERISTIQUES DE LA FOLIOLE	27
FIGURE 15 : CORRELATIONS LINEAIRE DE PRODUIT P ET DE L'AIRE FOLIOLAIRE SUR TOUS LES PALMIERS MESURES PAR LA METHODE DESTRUCTIVE	27
FIGURE 16 : EXEMPLE DE GRAPHIQUE DE L'AIRE DES FOLIOLES EN FONCTION DE LEUR POSITION RELATIVE SUR LE RACHIS SUR UN PALMIER SOCFINDO 1992.....	28
FIGURE 17 : SCHEMA DE LA MESURE DU LAI D'UN ARBRE AU LAI-2000 PCA	30
FIGURE 18 : MESURES AU LAI-2000 PCA SOUS LA CANOPEE	31
FIGURE 19 : PRISE DE PHOTOGRAPHIE HEMISPHERIQUE AUTOUR DU STIPE ET EXEMPLE DE PHOTOGRAPHIE.....	31
FIGURE 20 : CALCUL DU LAI A PARTIR DES DONNEES LA-2000 PCA	33
FIGURE 21 : MAILLAGE DES POINTS GPS	37
FIGURE 22 : COMPARAISON DES MNT APRES PRISE EN COMPTE DES POINTS GPS	38
FIGURE 23 : EXTRACTION DE LA RADIOMETRIE MOYENNE D'UN BLOC SUR LES QUATRE BANDES	39
FIGURE 24 : EXTRAIT DU ZOOM UTILISE POUR VECTORISER LES PALMIERS	40
FIGURE 25 : COMPARAISON DE DEUX DEFINITIONS DU LAI SUR LA METHODE DESTRUCTIVE .	41
FIGURE 26 : GRAPHES REPRESENTANT LES NUAGES DE POINTS DE LAI CALCULES A PARTIR DES METHODES DIRECTES ET INDIRECTES	43
FIGURE 27 : RELATION ENTRE NDVI EXTRAIT DE L'IMAGE ET LAI MESURE SUR LE TERRAIN...	45
FIGURE 28 : REPARTITION DES LAI MOYENS PAR BLOC AU SEIN DE LA PLANTATION	47
FIGURE 29 : COMPARAISON DE TROIS TYPES DE REPRESENTATION D'UNE CARTE DE LAI D'UN MEME BLOC DE PALMIERS.....	49
FIGURE 30 : CARTOGRAPHIE DU LAI A L'ECHELLE DU PALMIER SUR LA PLANTATION DE PADANG HALABAN, NORD-SUMATRA	51

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : RECAPITULATIF DES ARBRES MESURES PAR LA METHODE DESTRUCTIVE	24
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES 4 TYPES DE TRANSECTS TESTES	32
TABLEAU 3 : EXEMPLE DE TABLEAU DE RESULTATS POUR UN BLOC DE PALMIER 'D5B7' DE TYPE SOCFINDO, ANNEE DE PLANTATION 1996.....	35
TABLEAU 4 : CORRELATIONS ENTRE LAI DESTRUCTIF ET LAI INDIRECT	42
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA RELATION LINEAIRE OBTENUE ENTRE LAI ET NDVI A L'ECHELLE DU BLOC DE PALMIERS.....	45
TABLEAU 6 : CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA RELATION LINEAIRE OBTENUE ENTRE LAI ET NDVI A L'ECHELLE DU PALMIER INDIVIDUEL	46
TABLEAU 7 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU SATELLITE QUICKBIRD	V
TABLEAU 8 : MODES SPECTRAUX D'ACQUISITION DU CAPTEUR QUICKBIRD	V

Liste des annexes

ANNEXE 1 : Production et échanges mondiaux de l'huile de palme	I
ANNEXE 2 : Caractéristiques des méthodes de mesure indirecte du LAI	II
ANNEXE 3 : Détail du modèle utilisé pour calculer le lai avec le LAI-2000 PCA	III
ANNEXE 4 : Modélisation de la fraction de trou avec le logiciel Can_Eye.....	!ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
ANNEXE 5 : Caractéristiques du satellite et du capteur Quickbird ..	Erreur ! Signet non défini.
ANNEXE 6: Protocole de calcul du LAI en méthode destructive	VI
ANNEXE 7 : Protocole de calcul du LAI sur un bloc de palmiers, par la méthode des transects	IX
ANNEXE 8 : Ensemble des pré-traitements appliqués à l'image Quickbird	IXVI

Annexe1 : Production et échanges mondiaux de l'huile de palme



Table 11: Palm Oil: World Supply and Distribution

Thousand Metric Tons
Date Created 8/12/2008 8:54:44 AM

	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	Jul 2008/09	Aug 2008/09
Production						
Indonesia	13,560	15,560	16,600	18,300	19,700	19,700
Malaysia	15,194	15,485	15,290	17,400	17,400	17,400
Thailand	820	784	1,170	1,050	1,400	1,400
Colombia	647	690	770	830	830	830
Nigeria	790	800	810	820	820	820
Other	2,509	2,652	2,697	2,722	2,752	2,752
Total	33,520	35,971	37,337	41,122	42,902	42,902
Imports						
China, Peoples Republic of	4,363	4,975	5,139	5,700	6,200	6,200
India	3,525	2,899	3,800	4,300	4,700	4,700
EU-27	4,028	4,272	3,645	3,750	4,050	3,950
Pakistan	1,565	1,703	2,218	2,420	2,500	2,500
Bangladesh	757	847	950	1,000	1,070	1,070
United States	345	600	700	790	960	960
Egypt	616	754	780	750	925	925
Vietnam	198	358	440	575	575	650
Russian Federation	594	546	524	700	620	640
Iran	351	485	388	500	550	550
Other	7,593	8,716	8,045	8,733	8,946	9,036
Total	23,935	26,155	26,629	29,218	31,096	31,181
Exports						
Indonesia	9,631	11,696	11,450	13,505	14,800	14,800
Malaysia	12,684	12,931	12,900	13,800	13,840	14,060
Thailand	81	205	283	300	500	500
Papua New Guinea	327	330	360	380	405	405
Jordan	333	265	280	300	300	300
Other	1,497	1,426	1,578	1,533	1,530	1,530
Total	24,553	26,853	26,851	29,818	31,375	31,595

Annexe 2 : Caractéristiques des méthodes de mesure indirecte du LAI

L. Jonckheere et al / Agricultural and Forest Meteorology 121 (2004) 19

Table 2
Comparison between instruments allowing indirect LAI measurements

System	Illumination conditions	Spectral domain	No. of zenith angles	Azimuthal coverage	Gap size distribution	Reference readings	Post-processing	Computer resources
DEMON	Direct	430 nm	–	–	No	Yes	No	Low
Sunfleck ceptometer	Diffuse, direct	PAR	–	–	Yes	Yes	Yes	Low
AccuPAR	Diffuse, direct	PAR	–	–	Yes	Yes	No	Low
LAI-2000	Diffuse	<490 nm	5	Full range selectable by hardware	No	Yes	No	Low
Tracing Radiation and Architecture of Canopies (TRAC)	Direct	PAR	–	–	Yes	Yes	No	Low
Hemispherical Cameras	Diffuse, direct	Selectable	Full range	Full range selectable by software	Yes	No	Yes	High
Multiband Vegetation Imager (MVI)	Diffuse	VIS and NIR	Full range	Full range	Yes	No	Yes	High
Ideal device	Diffuse and direct	VIS and NIR	Full range	Full range selectable by software	Yes	No	–	–

Annexe 3 : Détail du modèle utilisé pour calculer le lai avec le LAI-2000 PCA (extrait de la notice technique <http://www.licor.com>)



Theory of Operation

Assumptions

The LAI calculations are based on four assumptions about the measured canopy:

- **The foliage is black.** It is assumed that the below-canopy readings do not include radiation that has been reflected or transmitted by foliage.
- **The foliage elements are small compared to the area of view of each ring** (see Foliage Size, page 9).
- **The foliage is randomly distributed within certain foliage-containing envelopes.** These envelopes might be parallel tubes (a row crop), a single ellipsoid (an isolated bush), an infinite box (turf grass), or a finite box with holes (deciduous forest with gaps).
- **Foliage is azimuthally randomly oriented.** That is, it does not matter how the foliage is inclined, but the leaves should be facing all compass directions.

No real canopy conforms exactly to these assumptions. Foliage is never random, but is clumped along stems and branches, and is not "black". Many species exhibit some degree of heliotropism, which violates the azimuthal randomness assumption. However, many canopies can be considered random, and living foliage does have low transmittance and reflectance below 400 nm.

Offsetting errors are common, such as when leaves are grouped along stems (transmittance higher than the random model), but are still preferentially positioned to minimize mutual shading (transmittance lower than the random model). In practice, most violations of the assumptions can be overcome with the proper measurement technique, and the model still works well even if all the assumptions are not met exactly.

Gap Fractions

Canopy structure information, including amount and orientation of foliage, can be estimated from measurements of gap fractions. The gap fraction of a canopy is the fraction of view in some direction from beneath a canopy that is not blocked by foliage. The fractional sunfleck area is equivalent to the gap fraction in the solar direction. The gap fraction technique is at present the most powerful and practical tool available for indirect sensing of canopy structure. It can be applied not only to continuous canopies, but also to settings which can be modeled by discrete, foliage-containing envelopes, such as row structure or individual trees.

Gap fractions have been measured using fisheye photographs (Anderson 1971, Bonhomme and Chartier 1972), by traversing a sunward-pointed sensor beneath the canopy (reviewed by Ross 1981, Lang et al 1985, Perry et al 1988), by linear light sensors (Walker et al 1988, Chen and Campbell 1988), and by pushing metal probes through the canopy (Warren Wilson and Reeve 1959).

Mathematical techniques for deducing foliage density and angle distribution from measurements of gap fraction (or contact frequency) have been presented by many authors, including Warren Wilson and Reeve (1959), Miller (1963, 1967), Philip (1965), Ross (1981), Anderson (1984), Lang et al (1985), Lang (1986, 1987), Perry et al (1988), and Norman and Campbell (1989).

Leaf Area Index

The optical sensor of the LAI-2000 consists of a fisheye lens and an optical system. The fisheye lens "sees" a hemispherical image, which the optical system focuses onto a photodiode detector made up of five concentric rings. Each detector ring views a different portion of the canopy or sky centered on one of the 5 view angles. The fraction of diffuse incident radiation that passes through a plant canopy, for each view angle, can be expressed as

$$\frac{\text{Diffuse intensity below the canopy at view angle } \theta}{\text{Diffuse intensity above the canopy at view angle } \theta} = T(\theta)$$

$T(\theta)$ is the probability of diffuse non-interceptance for a given view angle (ring) called the *gap fraction*; it is analogous to a transmittance. $T(\theta)$ depends on foliage orientation, foliage density and pathlength through the canopy in the same way that light transmittance through a solution depends upon extinction coefficient, absorber concentration and pathlength, i.e. according to the Beer-Lambert Law

$$T(\theta) = \exp(-G(\theta) \mu S(\theta))$$

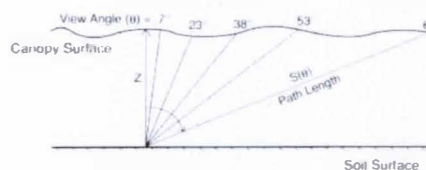
$$\text{or} \quad -\ln T(\theta) = G(\theta) \mu S(\theta) \quad (1)$$

where $G(\theta)$ is the fraction of foliage projected toward angle θ , μ is the foliage density (m^2 foliage per m^3 canopy; analogous to concentration) and $S(\theta)$ is the pathlength through the canopy for each view angle, θ . Miller gives an exact solution for foliage density, μ :

$$\mu = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\ln T(\theta)}{S(\theta)} \sin \theta d\theta \quad (2)$$

The ratio $-\ln T(\theta)/S(\theta)$ is called the contact number (m^{-1}). Equation 2 can be applied to any general canopy shape (rows, isolated plants, etc.) as long as $S(\theta)$ is known. For full cover canopy of height z , $S(\theta) = z/\cos \theta$ and LAI = $\mu \cdot z$, so equation 2 may be rewritten

$$\text{LAI} = -2 \int_0^{\pi/2} \ln T(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (3)$$



The LAI-2000 implements this equation by numerical integration using the 5 measured angles. The detector geometry fixes the value of $\sin \theta d\theta$ for each ring allowing computation of a constant weighting factor $w(\theta_i)$ for each ring. The numerical integration then becomes quite simple

$$\text{LAI} = -2 \sum_{i=1}^5 \ln T(\theta_i) \cos \theta_i w(\theta_i) \quad (4)$$

where the subscript i refers to each of the detector rings with view angle centered at θ_i .

Foliage Orientation

The LAI-2000 calculates mean tilt angle (MTA) after Lang (1986). Alternative orientation information such as the fraction of area in various angle classes can be calculated using the C2000 software (included).

Annexe 4 : Modélisation de la fraction de trou avec le logiciel Can_Eye (extrait de la notice : http://www.avignon.inra.fr/can_eye/)

2.2. From LAI to Gap Fraction

Following Warren-Wilson (1959), the mean number of contacts $N(H, \theta_v, \varphi_v)$ between a light beam and a vegetation element at a given canopy level H in the direction (θ_v, φ_v) is:

$$\text{Eq. 2} \quad N(H, \theta_v, \varphi_v) = \int_0^H G(h, \theta_v, \varphi_v) l(h) / \cos \theta_v dh$$

where $G(h, \theta_v, \varphi_v)$ is the projection function, i.e. the mean projection of a unit foliage area at level h in direction (θ_v, φ_v) . When the leaf area density and the projection function are considered independent of the level h in the canopy, Eq. 2 simplifies in Eq. 3:

$$\text{Eq. 3} \quad N(L, \theta_v, \varphi_v) = G(\theta_v, \varphi_v) \cdot LAI / \cos \theta_v$$

The projection function is defined as follows:

$$\text{Eq. 4} \quad \begin{cases} G(\theta_v, \varphi_v) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |\cos \psi| g(\theta_l, \varphi_l) \sin \theta_l d\theta_l d\varphi_l & (a) \\ \cos \psi = \cos \theta_v \cos \theta_l + \sin \theta_v \sin \theta_l \cos(\varphi_v - \varphi_l) & (b) \end{cases}$$

where $g(\theta_l, \varphi_l)$ is the probability density function that describes leaf orientation distribution function. This induces the two normalization conditions given in Eq. 5a and Eq. 5b.

$$\text{Eq. 5} \quad \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} g(\theta_l, \varphi_l) \sin \theta_l d\theta_l d\varphi_l = 1 & (a) \\ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} G(\theta_v, \varphi_v) \sin \theta_v d\theta_v d\varphi_v = \frac{1}{2} & (b) \end{cases}$$

The contact frequency is a very appealing quantity to indirectly estimate LAI because no assumptions on leaf spatial distribution, shape, and size are required. Unfortunately, the contact frequency is very difficult to measure in a representative way within canopies. This is the reason why the gap fraction is generally preferred. In the case of a random spatial distribution of infinitely small leaves, the gap fraction $P_0(\theta_v, \varphi_v)$ in direction (θ_v, φ_v) is related to the contact frequency by:

$$\text{Eq. 6} \quad P_0(\theta_v, \varphi_v) = e^{-N(\theta_v, \varphi_v)} = e^{-G(\theta_v, \varphi_v) LAI / \cos(\theta_v)}$$

This is known as the Poisson model. Conversely to the contact frequency that is linearly related to LAI, the gap fraction is highly non linearly related to LAI. Nilson (1971) demonstrated both from theoretical and empirical evidences that the gap fraction can generally be expressed as an exponential function of the leaf area index even when the random turbid medium assumptions associated to the Poisson model are not satisfied. In case of clumped canopies, a modified expression of the Poisson model can be written:

$$\text{Eq. 7} \quad P_0(\theta_v, \varphi_v) = e^{-\lambda_0 G(\theta_v, \varphi_v) LAI / \cos(\theta_v)}$$

where λ_0 is the clumping parameter ($\lambda_0 < 1$).

Annexe 5 : Caractéristiques du satellite et du capteur Quickbird

altitude:	inclinaison:	orbite:	période de révolution:	durée d'un cycle:
450 km	98 degrés	polaire héliosynchrone	98 minutes	1 à 3.5 jours

TABLEAU 7 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU SATELLITE QUICKBIRD

Mode	Bande	Bande spectrale	Résolution
Panchromatique	Unique	0,450 - 0,900 μm	0,6 m x 0,6 m
Multispectral	1 - Bleu	0,450 - 0,520 μm	2,5 x 2,5 m
	2 - Vert	0,520 - 0,600 μm	2,5 x 2,5 m
	3 - Rouge	0,630 - 0,690 μm	2,5 x 2,5 m
	4 – Infra rouge	0,760 - 0,900 μm	2,5 x 2,5 m

TABLEAU 8 : MODES SPECTRAUX D'ACQUISITION DU CAPTEUR QUICKBIRD

Annexe 6: Protocole de calcul du LAI en méthode destructive

PROTOCOL OF DESTRUCTIVE MEASUREMENTS FOR PALM TREE LAI ESTIMATION

(C. LELONG and F. ROUSSEL, April 2008)

- I. Acquire a set of measurements with the **LAI PCA**. The more than possible to get a good mean: about 24.
- II. Take **hemispherical photographs** with the digital camera and the fish eye objective. The more than possible to get good means too: about 12 to 20 .
- III. **Estimate the tree crown area:**
 - 1) Measure the stipe perimeter P_s at its base. The stipe radius is thus $R_s = P_s / (2\pi)$.
 - 2) Place the perch at the edge of the longer frond and keep it vertical. Measure the distance from the base of the stipe to the base of the perch.
 - 3) Move a little bit around the tree and repeat this measurement for each of the longest fronds (at least 8 times, to get a good mean).
 - 4) Derive the crown-edge mean distance to the stipe: D_c , and the crown mean radius: $R = D_c + R_s$.
 - 5) Derive the tree crown mean area, assuming a circle: $A_c = \pi * (R_c)^2$.
 $A_c = \pi * (D_c + P_s / 2 / \pi)^2$

IV. **Estimate the stipe height:**

Place the perch against the stipe on the soil. Make a mark on the perch. Get the perch down and measure the distance between the perch extremity and the mark.

V. **Count the number of frond in the tree.**

VI. **Cut three fronds** of different ages, and in good health: for instance fronds number (3 or 5) + (9 or 11) + (15 or 17), depending the tree state.

VII. Measure the **length of the frond rachis** and tick a mark at the location of the rachis beginning. Calculate the distances corresponding respectively to 30% and 70% of the rachis length and tick the corresponding mark on the frond.

VIII. **Count the number of leaflets** for each side of the frond. Write reference numbers (for example each 10 leaflets) on the rachis, so we can know quickly the number for any leaflet of the frond. This number will be written later on the cut leaflets.

IX. **Leaflets sampling:**

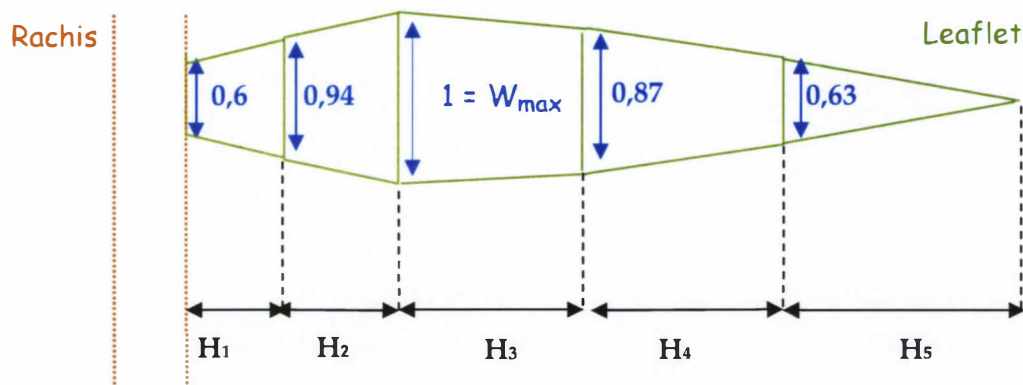
Apply the following procedure for **each frond and each side** (right and left) **of a given frond** independently, making sure not to mix the different positions of cut leaflets (best way to avoid confusion is to write directly on the leaflet: tree number, frond number, side (L or R), position on rachis and number of leaflet). **Record carefully the leaflet location on the rachis** (distance from the rachis beginning mark) and the **number of the leaflet** (count from the beginning of the rachis, to the end of the frond), thus for each sampled leaflet!

- 1) Count and write on the rachis the **numbers of leaflet**. This information will be later write on the leaflet which will be cut. The first leaflet is located at the beginning of the rachis, close to the insertion of the frond on the trunk.
- 2) Identify and cut **the longest leaflet**. Be careful not to bend the leaflets while choosing this longest to avoid the bending effect on size. If you are not confident in a simple observation, measure quickly the leaflet length on those which seems the longest or select two leaflets.

- 3) Identify and cut the **closest leaflet to the B point**. Add the "B" sign to the other information written on the leaflet.
- 4) Cut **10 leaflets regularly distributed** along the rachis between the marks 30% and 70% (about 1 each 6).
- 5) Cut **3 or 4 leaflets** (about 1/10) between 0 and 30%, and 3 or 4 more between 70% and 100%, trying to get the smallest leaflets that are complete.

X. Leaflets Area Estimation.

A leaflet is assumed to be a succession of trapezoids and one triangle (cf. Tailliez and Ballo Koffi, "Plantations", 1992):



Measure on each leaflet its **length L** and **maximum width W_{max}** .

Derive $0.6 \cdot W_{max}$, $0.94 \cdot W_{max}$, $0.87 \cdot W_{max}$, and $0.63 \cdot W_{max}$.

Measure the height of each corresponding trapezoid and triangle (distance between two characteristic widths).

Derive the leaflet area using the relationship:

$$A_{\text{leaflet}} = W_{\text{max}} * (0.94 \cdot H_1 + H_2 + H_3 + 0.87 \cdot H_4 + 0.315 \cdot H_5)$$

Important remark: Actually, you may be able to avoid this long procedure thanks to the proportionality of the quantity $P = L * W_{max}$ with the leaflet area A_{leaflet} :

- a) Apply the whole protocol for 3 different trees of the same planting material
- b) Trace the graph $A_{\text{leaflet}} = f(P)$
- c) Derive ρ , the coefficient of proportionality between A_{leaflet} and P .
- d) For any other leaflet sampled on trees of the same planting material, only measure its length L and maximum width W_{max} , and derive $A = \rho * P$.

XI. Fronde area estimation

- 1) Trace the graph $A = f(d)$, where d is the leaflet position on the rachis, for each half frond.
- 2) On the basis of the number of leaflets on the given half frond, interpolate the un-sampled leaflets area.
- 3) Sum the areas of all the leaflets of the half frond.
- 4) Sum the two half-frond leaflet area.

XII. Tree leaf area estimation

- 1) Derive the mean frond area of the tree.

- 2) Multiply this mean area to the number of frond in the tree to get the tree frond area.
- 3) Compare to the Relative Frond Area (ref. J.-P. Caliman):

$$RFA = \text{mean}(W_{\text{max}}) * \text{mean}(L) * (\text{number of leaflets}) * 1.1 * 0.0001$$

XIII. Tree Leaf Area Index (LAI) estimation

Divide the tree frond area by the mean tree crown area to get the LAI.

XIV. Compare this destructive-LAI value to:

- the result of Can-Eye computing on the set of hemispherical photographs
- the result of the F2000 computing on the LAI PCA measurements, multiplied by the clumping factor derived in Can-Eye.

REMINDER

Data to be recorded on each sampled tree

1. Stipe height (tinggi batang)
2. Stipe perimeter (lingkar batang)
3. Distances from the stipe to the external leaves (jarak dari batang ke batas akhir)
4. Number of fronds (jumlah pelapah)

Data to be recorded for each cut frond (3 or 5-9-15)

1. Frond number (nomor pelapah)
2. Length of the rachis
3. Number of leaflets on the left side (jumlah daun kiri)
4. Number of leaflets on the right side (jumlah daun kanan)

Data to be recorded for each sampled leaflet (written directly on the leaflet)

(Or on a separate sheet, this latest option implying more time).

- Tree number (optional)
- Frond number
- Frond side (L or R)
- Leaflet number, starting from the rachis beginning to the extremity of the frond
- Position on the rachis (distance from the rachis beginning)
- "B" letter if the leaflet is the one closet to the B point

Annexe 7: Protocole de calcul du LAI sur un bloc de palmiers, par la méthode des transects

Analysis of the influence of different sampling methods on the estimation of LAI using LAI PCA in a whole block.

One of the aims of the project is to try to estimate the mean LAI of a given block by remote sensing (out of a numerical multispectral satellite image), deriving relationships between vegetation indices and field LAI.

In the fields, the objective is to estimate a mean value for a whole block, using a LAI PCA. The user walks through the block, following a given route dedicated to sample the whole variability of the block LAI. An important issue is to minimize the time spent for this task without loss of information. Different solutions exist, but none has been proved more efficient or providing less errors.

We propose here to test four different methods and compare their respective result.

- 1) Simple W
- 2) Enriched W
- 3) SQR
- 4) Genius

Reminder: A block numbering begins at the North Western corner.

The LAI PCA instrument is equipped with a cap screening 270° (the same than the LAImeter used as the “above” reference located in the open area). Each time a measure is taken, at the same place, a hemispherical picture must be taken.

Description of routes and protocols:

- 1) Simple Z (Figure 1):

The user begins at the palm-tree number 3-3 (line 3, 3rd palm on the line from the NW corner).

He walks in the South-East direction (following a compass, for instance) in a (more or less) straight line. Each forty steps (theoretically 3.5 times the mean palm trees height: 40 steps for adults, it should be less for immature trees), he acquires a measurement with the LAI PCA.

- first branch:

First, he orients the sensor in his walking direction (SE).

Second, he orients the sensor perpendicular to this direction, looking towards the right.

Third, he orients the sensor perpendicular to this direction, looking towards the left.

Then, he repeats this sequence until he reaches the border of the block.

- second branch:

The user walks in the South-West direction and repeats the sequence explained for the first "branch" of the W, considering this new direction as a reference for the sensor orientation.

- next branches repeat successively these two branches until the user reaches the southern border of the block, stopping about 3 trees before this edge.

2) Enriched Z (Figure 2):

The user follows the same route (branches) as explained for simple Z :

- begins at palm tree number 3-3
- walks through the block, following South-East direction until he reaches the border line
- walks through the block again from the East border line to the West border line, following the new direction South-West

The main difference consists in acquiring the measurements. We consider a triangle formed by 3 close palm trees (a missing tree must be considered as a tree) called the basic unit. This basic unit is divided in 4 smaller triangles. At the centre of each small triangle, a measure of LAI is taken with the LAI PCA.

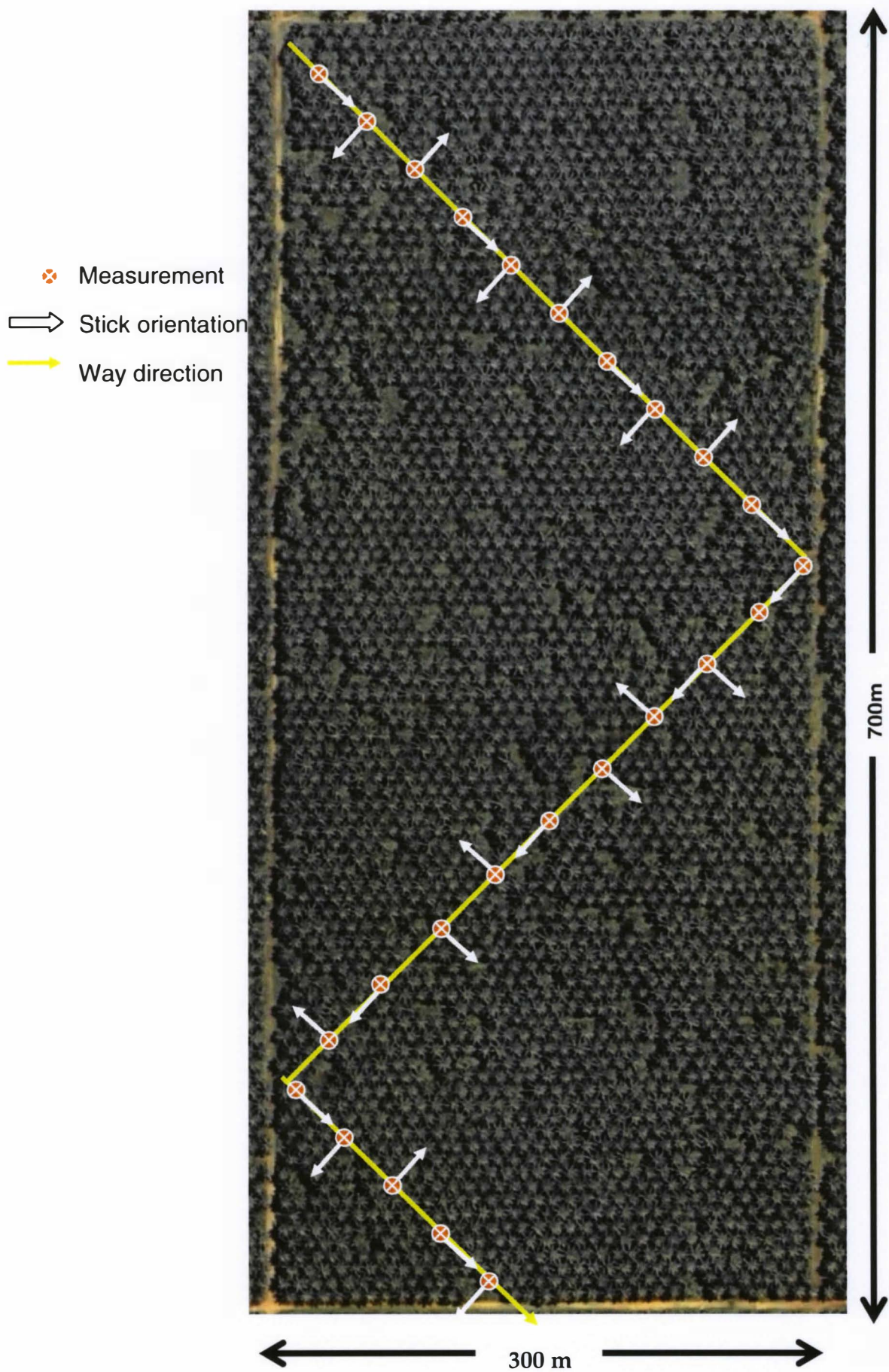
3) SQR Transect (Figure 3):

The user begins by taking measures on the length of the block, (2 length at least or more depending on the size of the block). Then, measures are taken on the width of the block (at least 4, more if necessary depending on the size of the block). Measures are taken each 40 steps the stick always oriented the same, straight to the direction followed.

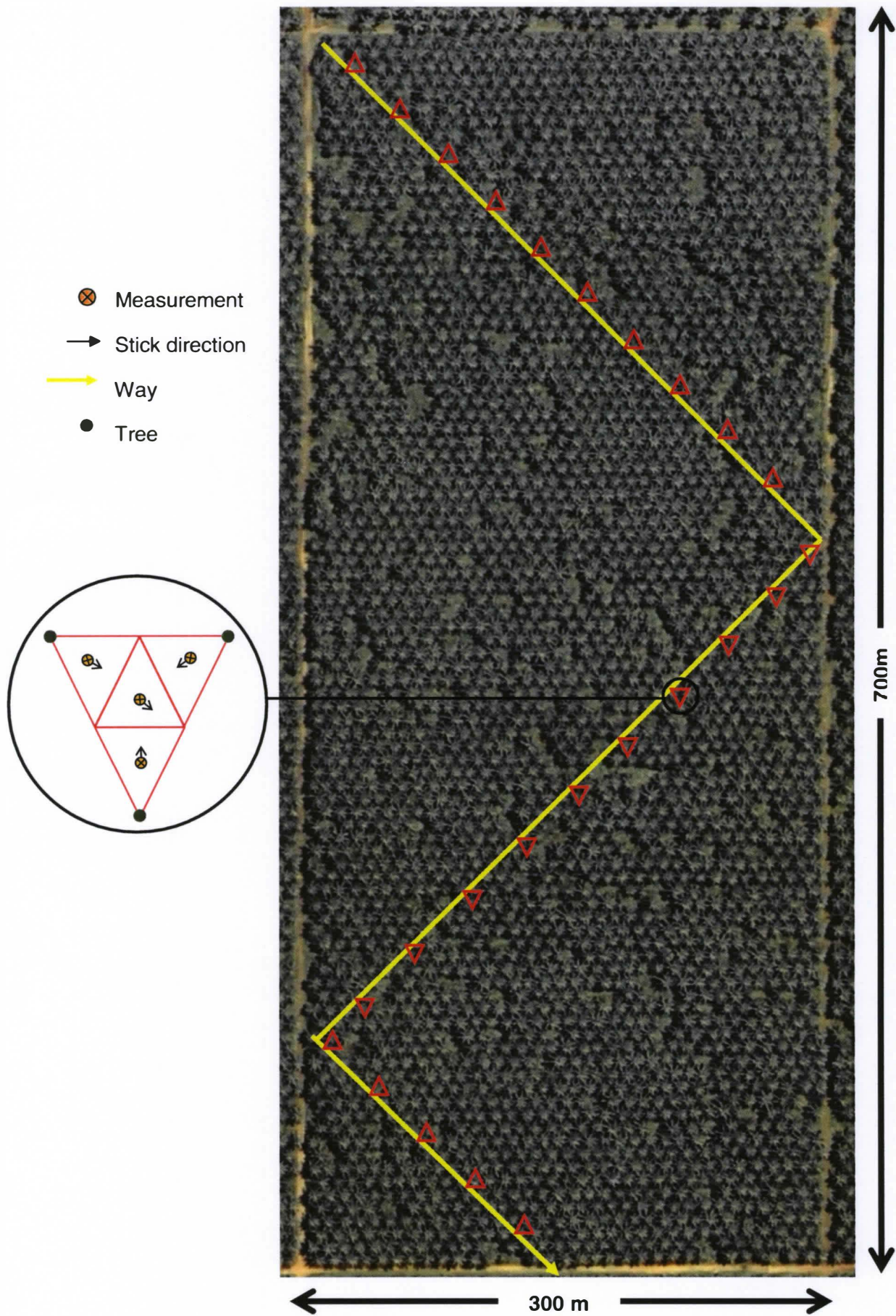
- begin at one half of the block (divide in the length), North-East or North West
- walk straight through the block following straight South direction until South edge
- second length begins on the other half block (divide in the length) and follow the opposite direction : straight North
- first width begins from North East at the top of the block. The user walk straight West until he reaches the West edge, taking measurements the same way as the for the length : each 40 steps, direction straight to the route
- the user walk then straight south to reach the beginning point of the second width, no measurements are taken
- second width begin from North West side at the bottom of the half block (divide in the width) and walk straight East, taking measurements the same as before
- next two width are repeat successively these two first widths

4) Genius transect (Figure 4):

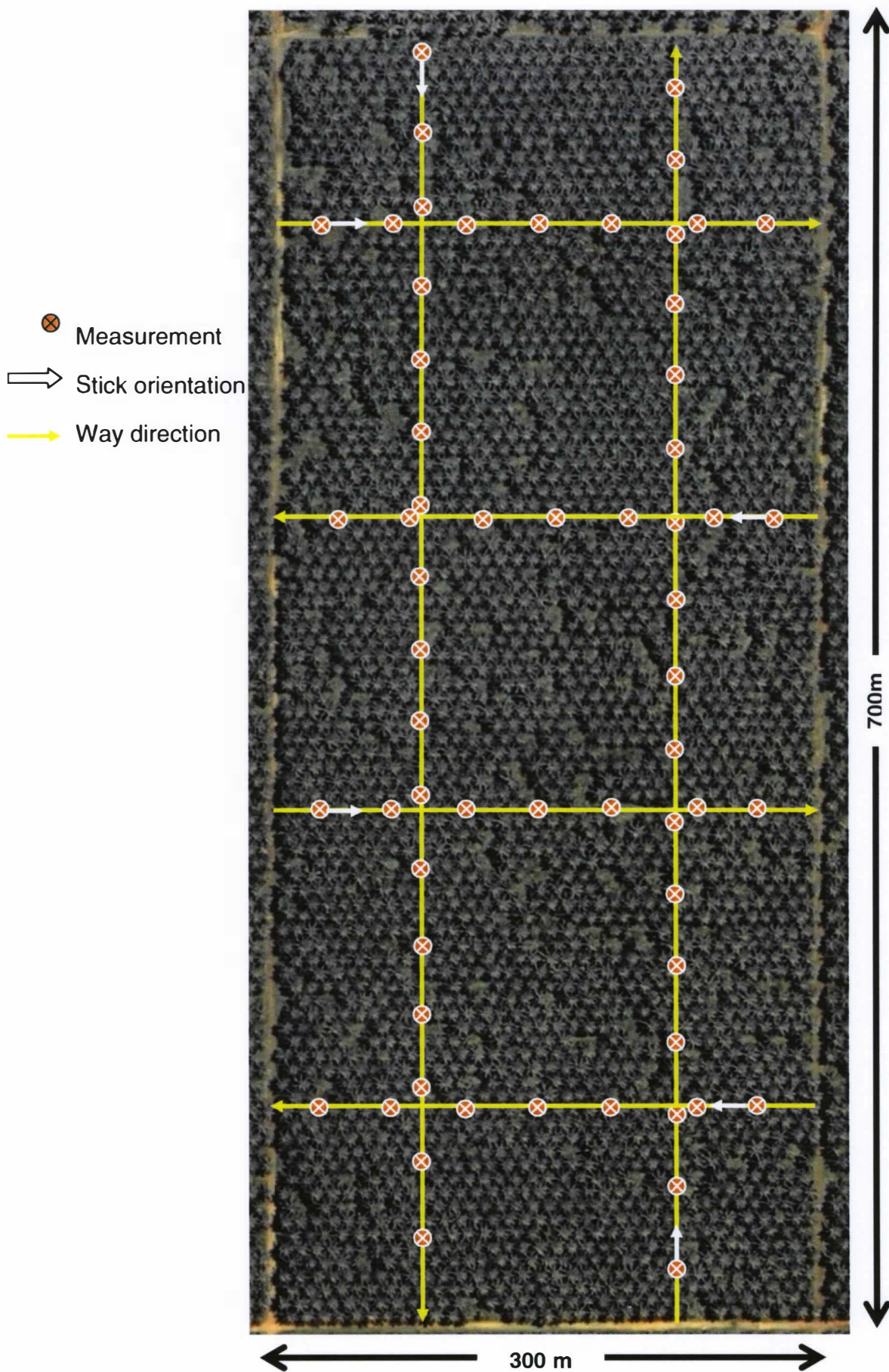
It is a breed between Enriched and SQR transect. The user only takes measurements on at least 4 width of the block from North to South. The measures are taken as for the E. transects: the basic unit is a triangle formed by 3 close palm trees divided in 4 smaller triangles, in the middle of each of these 4 smaller triangles a measure is taken. Each 40 steps of the width, a triangle is chosen by the user (next trees of the line, closest to the user).



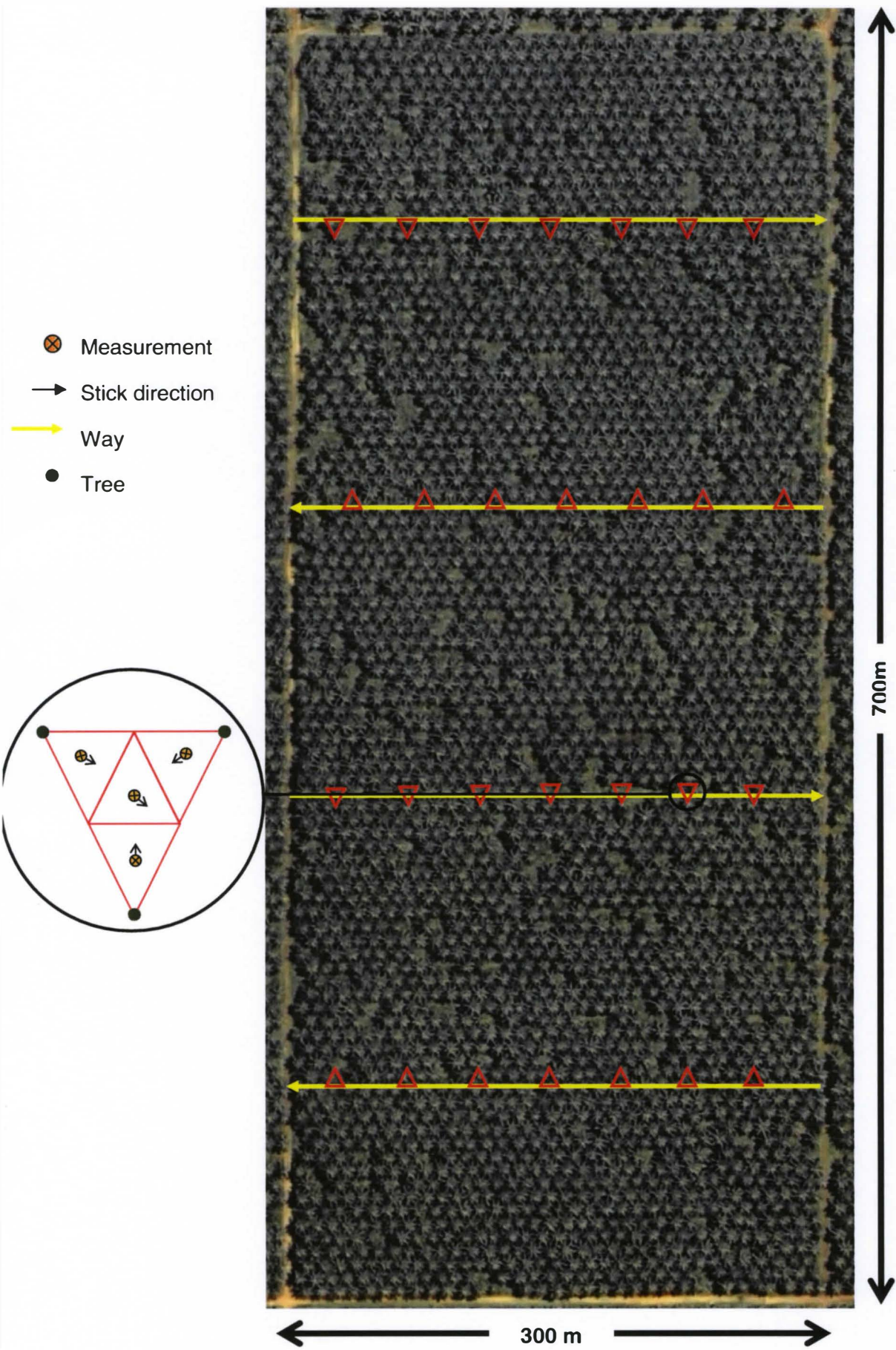
1. Simple Z Transect



2. Enriched Z Transect



3. Square Transect



3. Genius Transect

Annexe 8: Ensemble des pré-traitements effectués sur l'image Quickbird

